

UTILE EN BIOLOGIE

MENACEUR Fouad



# LES PROTEINES

COURS DE BIOCHIMIE STRUCTURALE

2<sup>ÈME</sup> ANNÉE  
GÉNÉTIQUE  
BIOCHIMIE  
IMMUNOLOGIE  
ÉCOLOGIE  
MICROBIOLOGIE  
ZOOLOGIE

Editions Al-Djazair

MENACEUR Fouad

COURS

**BIOCHIMIE**  
**STRUCTURALE**  
✱  
**LES PROTEINES**

Editions Al-Djazair

# Avant propos

---

**V**ue la grande disponibilité des ressources pédagogiques en **Biologie**, l'étudiant de biologie peut se retrouver submergé d'informations provenant de différents documents, ce qui pourrait induire une confusion chez lui. La **série : Utile en Biologie** a pour but d'apporter aux étudiants de 2<sup>ème</sup> année LMD, les éléments suffisants mais aussi nécessaires de cours des matières essentielles : Biochimie, génétique, Immunologie, Ecologie, Techniques de communications en Anglais....ect. Nous avons évité intentionnellement de détailler certains chapitres qui pourront paraître compliqués ou impliquer d'autres domaines de la biologie.

Nous présentant le cours de **Biochimie structurale** sous forme de livrent couvrant chacun un groupes de molécules biologiques (Glucides, lipides, protéines, acides nucléiques, enzymes).

**MENACEUR Fouad**

# Introduction:

---

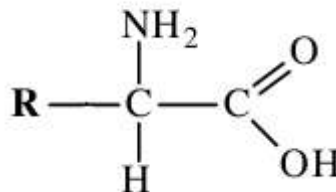
**L**e terme protide regroupe des molécules de fonctions biologiques diverses mais possédant une structure, une organisation proche. Chimiquement les protides sont caractérisés par la présence d'azote en proportion importante ( $\pm 16\%$ ) et d'un peu de soufre. Ils réagissent spécifiquement à la réaction du biuret et à la réaction xanthoprotéique.

L'hydrolyse (coupure par l'eau) des molécules protidiques libère toujours un mélange de composés à structure caractéristique: les acides aminés. Le terme protide désigne donc l'ensemble des acides aminés naturels et de leurs combinaisons chimiques qui sont les peptides (enchaînement d'un petit nombre d'acides aminés, structure simple) et les protéines (enchaînement d'un grand nombre d'acides aminés, architecture complexe).

Une molécule protidique peut s'associer avec d'autres molécules (ions métalliques, glucides, lipides ou autres) par des liaisons covalentes ou de faible énergie. Une protéine formée exclusivement d'acides aminés est une holoprotéine, si un composé, appelé groupement prosthétique, est lié à la chaîne protéique, la protéine est une hétéroprotéine.

## 1. Acides aminés:

Les aminoacides sont des monomères des molécules protéiques comportant au moins un groupe aminé primaire ( $-\text{NH}_2$ ) ou secondaire ( $-\text{NH}-$ ) "Cas de la Proline" et au moins un groupe carboxylique ( $-\text{COOH}$ ). La fonction amine occupe une position  $\alpha$  par rapport au groupe carboxyle. Les acides  $\alpha$  aminés ont la structure suivante:



Où: **-R** est un résidu qui est

une chaîne latérale variable.

### ➤ Les 20 acides aminés protéiques :

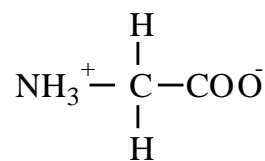
L'hydrolyse des protéines donne en général 20 acides aminés naturels 'standards', La manière la plus commune et utile de classer ces derniers est selon la structure et la qualité de leur chaîne latérale -R

**1.1. Acides aminés aliphatiques :** Ils sont classés selon le nombre d'atome de carbone et de ramifications. Glycine, Alanine, Valine, Leucine, Isoleucine.

**Glycine (Gly)**

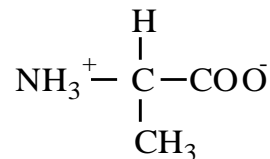
C'est l'acide aminé le plus simple (2C), le seul à ne pas posséder un atome de carbone asymétrique.

R= H

**Alanine (Ala)**

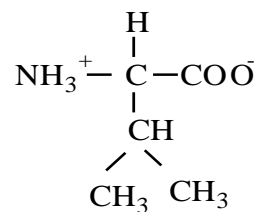
Acide aminé à 3 carbones.

R= Groupement Méthyle.

**Valine (Val) :**

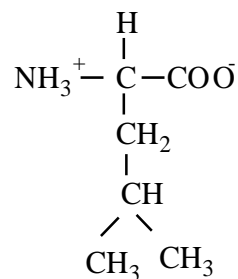
Acide aminé à 5 carbones

R= Groupement Isopropyle

**Leucine (Leu) :**

Acide aminé à 6 carbones

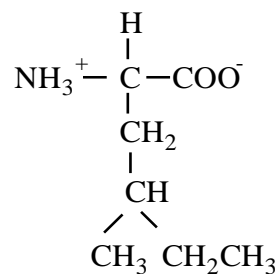
R= Groupement Isobutyle

**Isoleucine (Ile) :**

Acide aminé à 6 carbones

R= Groupement butyle secondaire

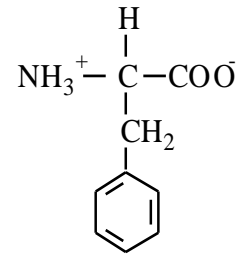
C'est un isomère du Leucine.

**1.2. Acides aminés aromatique :**

Leurs chaînes latérales contiennent un cycle aromatique : Phénylalanine, Tyrosine, Tryptophane.

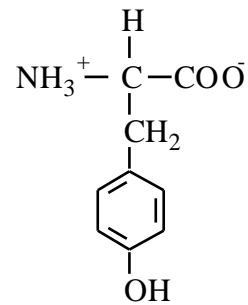
**Phénylalanine (Phe) :**

R= Groupement Phényle

**Tyrosine (Tyr) :**

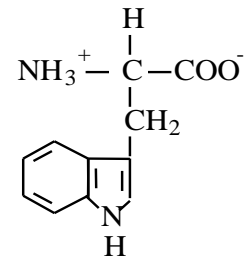
Dérivé de la phénylalanine. Son noyau aromatique porte un groupement alcool (-OH).

R= Groupement Phénol

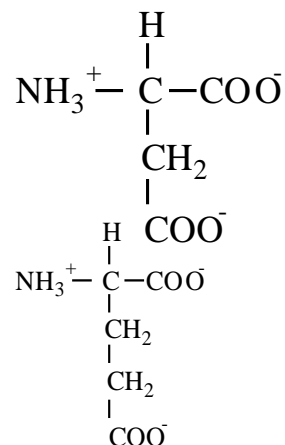
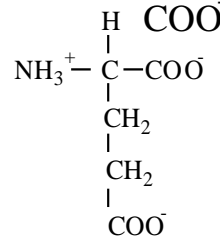
**Tryptophane (Trp) :**

Sa chaîne latérale comporte un noyau benzénique avec un noyau Pyrole

R= Indole = (Benzène + Pyrole).

**1.3. Acides aminés acides :**

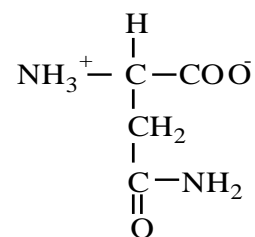
La chaîne latérale contient une fonction carboxyle supplémentaire qui se situe à l'extrémité.

**Acide aspartique (Asp) :**R= Groupement  $\beta$ -carboxyle.**Acide glutamique (Glu) :**R= Groupement  $\gamma$ -carboxyle.**1.4. Amides des acides aminés acides :**Ils dérivent des acides aminés acides (Asp et Glu) en masquant la fonction  $\beta$ -COOH par fixation de l'ammoniac  $-\text{NH}_3$  ; d'où le nom de dérivé amidé.

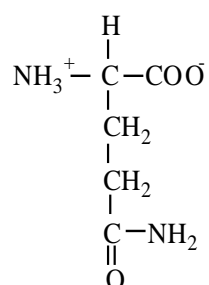
**Asparagine :**

Amide de l'acide aspartique.

Le groupement amide n'est pas protonable : le doublet électronique de l'azote est délocalisé et engagé dans une orbitale hybride  $sp^2$  avec les atomes C et O.

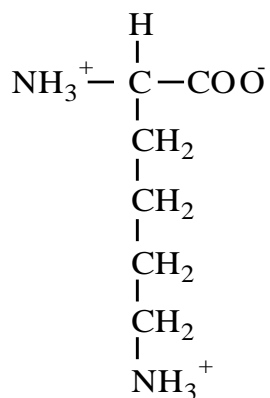
**Glutamine :**

Amide de l'acide glutamique

**1.5. Acides aminés basiques :****Lysine :**

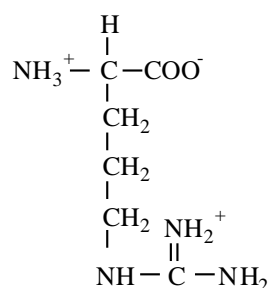
R= groupement  $\epsilon$ -amino

Le groupement  $\epsilon$ -amino est un accepteur de proton (forme acide conjugué : ion ammonium).

**Arginine :**

R= groupement  $\delta$ -guanidyle

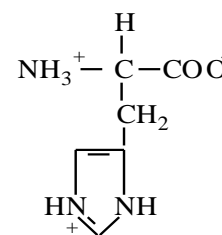
La double liaison de l'azote (a) et les doublets libres des deux autres azotes forment un hybride de résonance. Seul le doublet de l'azote (a) est libre et peut fixer un proton.



**Histidine:**

R= groupement imidazole

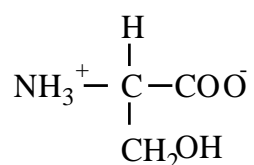
Le doublet libre de l'azote en position 3 est un accepteur de proton. Le doublet de l'azote en position 1 participe à la conjugaison des doubles liaisons et n'est pas disponible pour accepter un proton. Bien évidemment, les rôles des deux azotes peuvent être échangés (formes mésomères).

**1.6. Acides aminés alcools :**

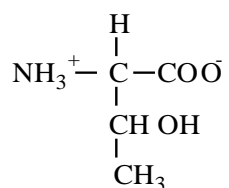
La chaîne latérale contient une fonction alcool. Les groupes OH ne sont pas ionisables.

**Sérine :**

R= Alcool primaire

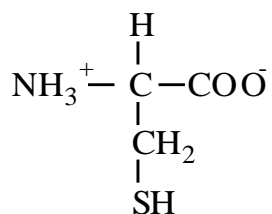
**Thréonine :**

R= Alcool secondaire

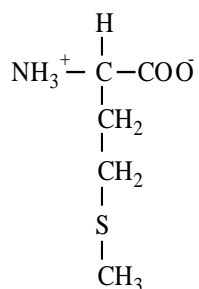
**1.7. Acides aminés soufrés :****Cystéine :**

Le groupement thiol (SH) ou sulfhydryle est un donneur de proton, c'est un acide très faible (forme base conjuguée : thiolate).

R= Le groupement thiol (SH)

**Méthionine :**

R= groupement thioéther

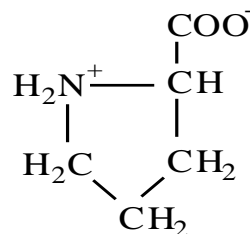




## 1.8. Iminoacide :

### Proline :

Le groupe  $\alpha$ -amino est engagé dans une structure cyclique. L'amine est une amine secondaire (imine) dont l'azote présente un doublet libre, accepteur de proton : la fonction base d'un acide aminé est donc conservée.



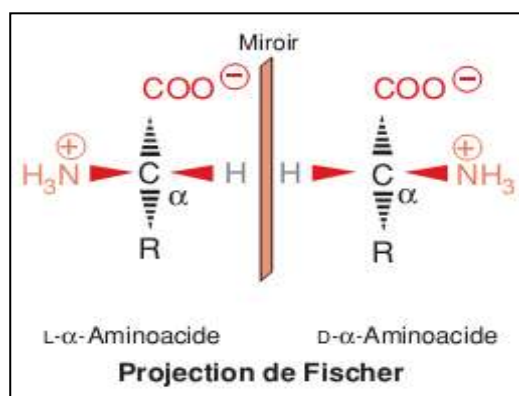
## 1.1. Propriétés physiques :

### 1.1.1. Solubilité:

Elle varie selon la taille et la polarité de les résidus -R. En générale la solubilité dans l'eau diminue avec l'augmentation du nombre d'atome de carbone et augmente en présence de groupement hydrophile: "-OH, NH<sub>2</sub>, -COOH". Leur solubilité dans le méthanol suit la règle inverse de la solubilité dans l'eau.

### 1.1.2. Pouvoir rotatoire:

A l'exception de la glycine, le carbone  $\alpha$  porte quatre substituants différents : c'est donc un centre chiral dont la conformation définira les stéréoisomères, isomères optiques à pouvoir rotatoire spécifique opposé. Les deux énantiomères sont définis de la même manière que pour les oses en prenant le glycéraldéhyde comme référence dans la représentation de Fischer :



**N.B:** Tous les acides aminés naturels appartiennent à la série L.

Comme pour les oses, un acide aminé de série L peut être lévogyre ou dextrogyre.

### 1.1.3. Propriétés spectrales:

#### - Absorption dans la lumière ultra-violette:

Tous les acides aminés absorbent les radiations UV à des longueurs d'ondes inférieures à 230 nm. Les acides aminés aromatiques (Tyr, Trp, Phe) absorbent à 270-280 nm.

La solubilité des aminoacides dans l'eau (de un gramme à une centaine par litre) va dépendre essentiellement de deux facteurs :

- le double groupement fonctionnel commun qui peut s'ioniser et donc favoriser la dissolution

- la chaîne latérale qui peut avoir un caractère plus ou moins polaire ou apolaire.

La solubilité dans les solvants organiques est faible de quelques mg/L et encore moins dans les solvants plus apolaires. En présence de deux phases liquides (éthanol/eau), les aminoacides se répartissent dans les deux phases avec des coefficients de partage spécifique : cette propriété est utilisée pour les classer.

- **Absorption :**

- les aminoacides n'absorbent pas la lumière visible, leurs solutions sont incolores.

- les bandes d'absorption dans l'infrarouge sont caractéristiques de leurs chaînes latérales

- les chaînes latérales aromatiques des aminoacides ont des spectres d'absorption caractéristiques dans l'ultraviolet moyen.

La phénylalanine absorbe peu et le tryptophane est 4 fois plus absorbant que la tyrosine au maximum d'absorption, proche de 280 nm. Cette propriété est très souvent utilisée pour le dosage des peptides et des protéines.

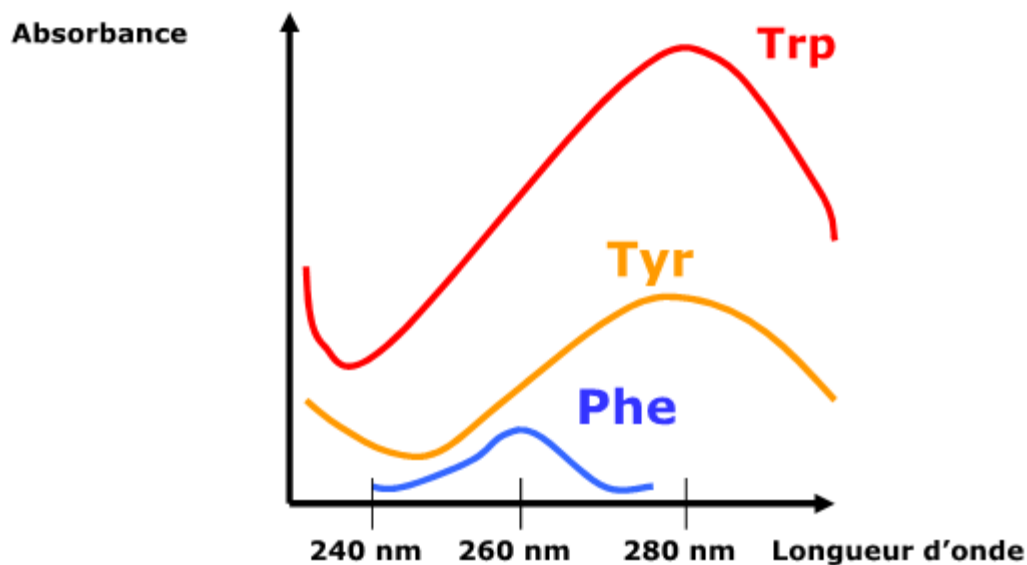
Remarquons que l'absorption de la tyrosine dans l'UV sera dépendante de l'état d'ionisation du phénol et par conséquent du pH.

- **Fluorescence:**

Certaines molécules, lorsqu'elles sont excitées par une lumière incidente à une longueur d'onde où elles absorbent ce rayonnement émettent une lumière de longueur d'onde plus grande : c'est le phénomène de fluorescence qui est maximum pour une longueur d'onde excitatrice égale à leur maximum d'absorption. Cette émission est très dépendante des molécules voisines : cette dépendance permet des études fines de l'environnement des molécules fluorescentes.

C'est le cas du tryptophane et de la tyrosine dont la fluorescence permet l'étude de leur environnement proche dans les protéines (analyse de structure tridimensionnelle ou de mécanisme catalytique).

Seul le tryptophane est fluorescent, lorsqu'il est soumis à un rayonnement à 270 nm, il émettra une lumière fluorescente à une longueur d'onde de 340 nm.



### 1.2. Propriétés acido-basiques (Ionisation des acides aminés) :

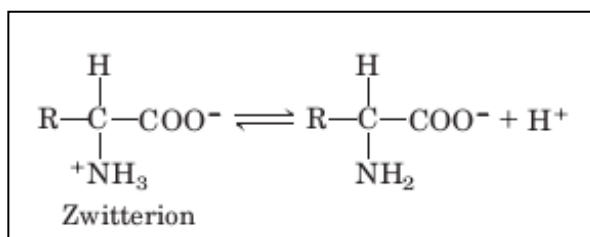
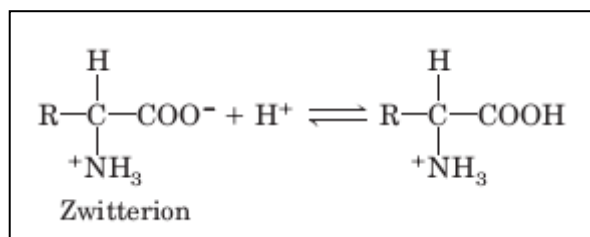
Quand un acide aminé est dissous dans l'eau, il existe en solution en tant qu'ion dipolaire, ou **Zwitterion**. Un zwitterion peut agir en tant que l'un ou l'autre un acide (donateur de proton). Les substances ayant cette nature duelle sont amphotères et s'appellent souvent les ampholytes (« des électrolytes amphotères »).

Un monoamino simple monocarboxylique -l'acide aminé, tel que l'alanine, est un acide diprotique une fois entièrement protonated lui a deux groupes, le groupe d'OCOOH et le groupe ONH<sub>3</sub>, qui peuvent rapporter des protons.

Il s'agit de décrire le comportement d'un acide aminé en solution à pH variable. A cause de la présence d'au moins deux groupements ionisables sur chaque acide aminé, le changement de l'acidité du milieu entrainera des échange de protons H<sup>+</sup> entre ces fonction et causera des modifications de la charge totale du composé.

- La forme acide du groupement acide carboxylique est -COOH, sa forme basique est -COO<sup>-</sup>.

- La forme acide du groupement amine est -NH<sub>3</sub><sup>+</sup>, sa forme basique est -NH<sub>2</sub>.



➤ **pH isoélectrique et pK de dissociation:**

Considérons une molécule portant des fonctions ionisables telles que différentes formes chargées de la molécule puissent exister en solution aqueuse. Le pH isoionique ( $pH_i$ ) est la valeur du pH de la solution dans laquelle la charge totale nette moyenne de la molécule est nulle: (on dit aussi pH isoélectrique).

- Si le pH du milieu est supérieur à la valeur du  $pH_i$ , la charge nette moyenne de l'acide aminé est négative.

- Si le pH du milieu est inférieur à la valeur du  $pH_i$ , la charge nette moyenne de l'acide aminé est positive.

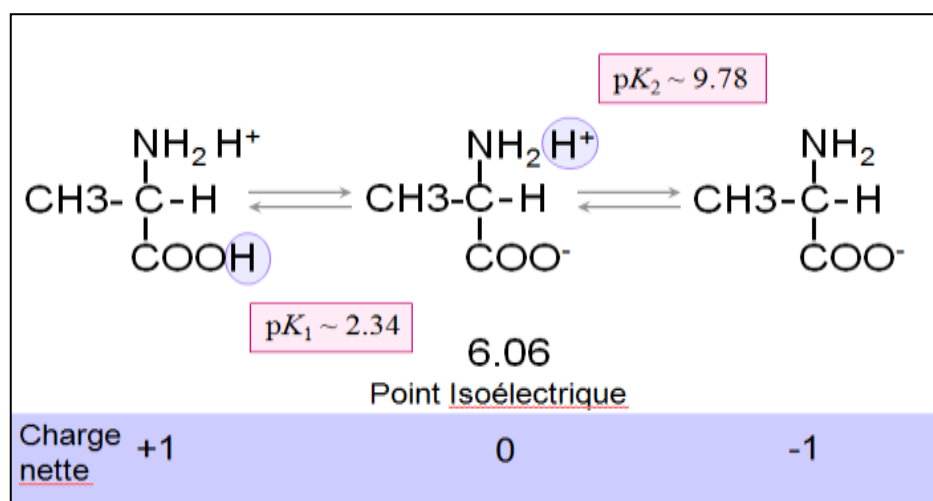
**pKa:** Valeur de pH du de la solution à partir de laquelle le groupement carboxyle  $-COOH$  libère un proton  $H^+$  et se transforme en ion  $-COO^-$ .

**pKb:** Valeur de pH du de la solution à partir de laquelle le groupement  $-NH_2$  accepte un proton  $H^+$  et se transforme en ion  $-NH_3^+$ .

**pKr :** Valeur de pH du de la solution à partir de laquelle le groupement carboxyle ou amine porté par le radical  $-R$  s'ionise en acceptant ou en libérant un proton  $H^+$ .

**A. Cas d'un acide aminé neutre (ne portant pas de groupement amine ou carboxyle sur son radical  $-R$ ):**

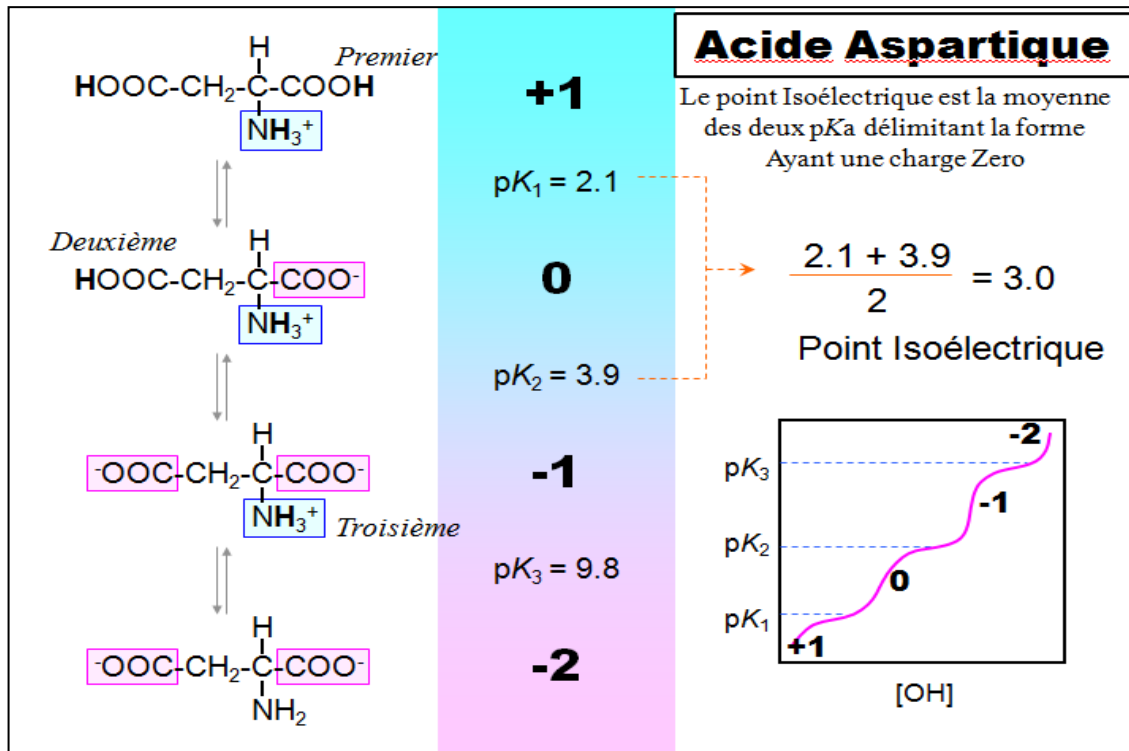
**Exemple:** La glycine



**B. Cas d'un acide aminé acide:**

Les deux acides aminés: acide aspartique et acide glutamique possèdent un groupement acide carboxylique dans le radical  $R$ , ils ont donc trois groupements ionisables. C'est le groupement  $-NH_3^+$  primaire qui a le plus fort pK ( $pK_b$ ), puis vient le groupement  $-COOH$  du radical  $R$  ( $pK_r$ ), et le groupement  $-COOH$  est possède le pK le plus faible plus faible ( $pK_a$ ).

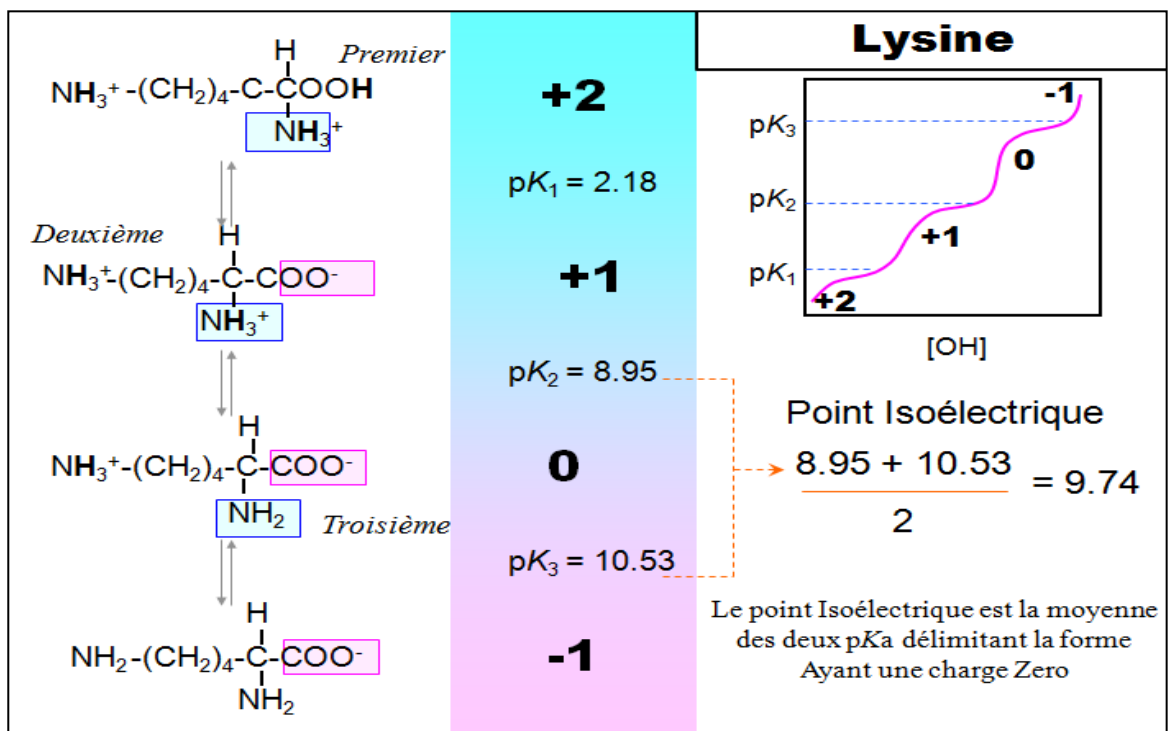
**Exemple:** L'acide aspartique



### C. Cas d'un acide aminé basique:

Ces acides aminés portent une amine sur leur chaîne latérale, le phénomène d'ionisation est représenté par les équilibres successifs suivants (le pK de la fonction  $\alpha$ -amine est plus faible que celui de la fonction R-amine).

**Exemple:** La lysine



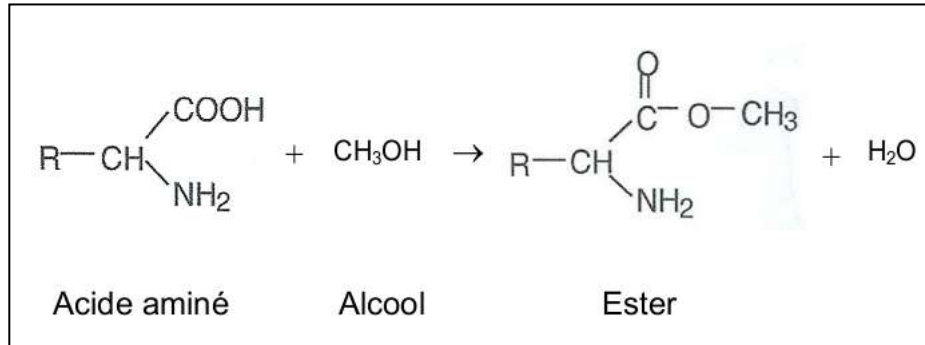
### 1.3. Propriétés chimiques:

La présence d'au moins deux groupement fonctionnels chez les aminoacides leur confère une aptitude à réagir avec différents composés chimiques:

#### 1.3.1. Propriétés chimiques due à la fonction carboxyle -COOH:

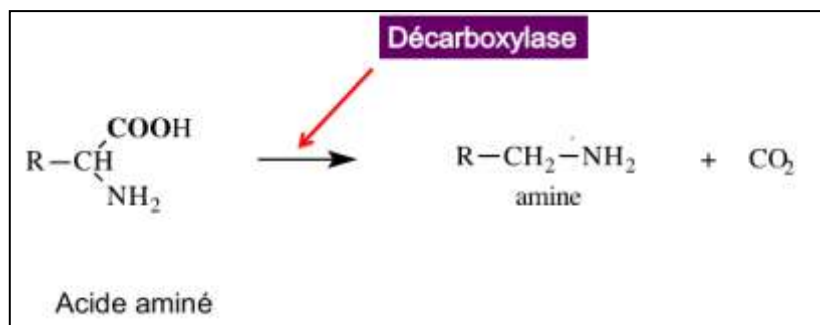
##### 1.3.1.1. Estérification:

Les acides aminés réagissent avec les alcools en formant des esters.



##### 1.3.1.2. Décarboxylation:

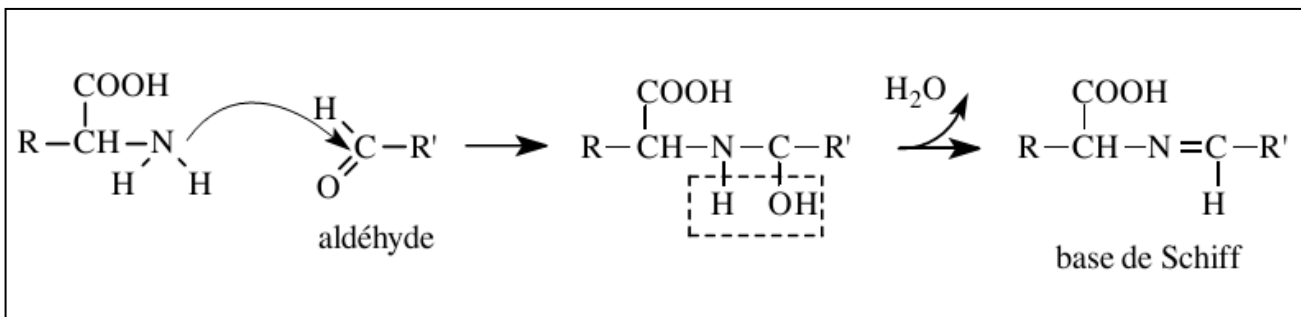
Cette réaction est importante d'un point de vue biochimique. Elle aboutit à la formation d'une amine.



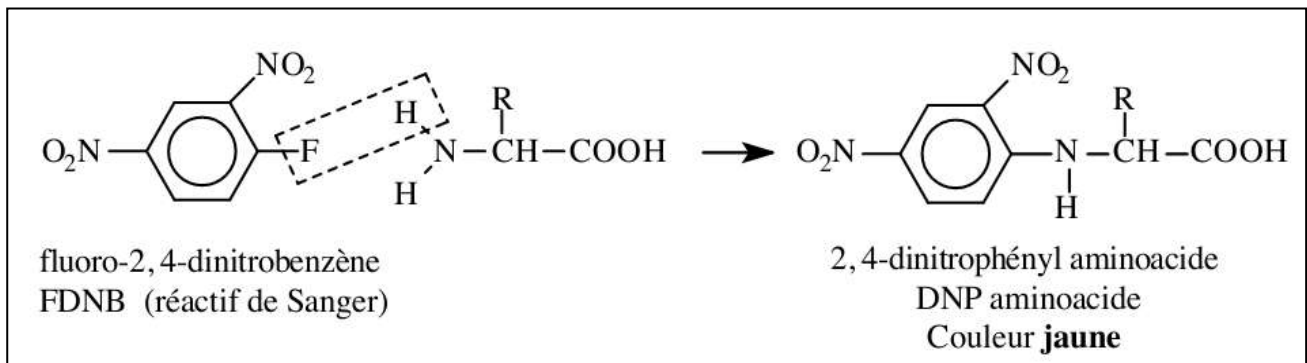
#### 1.3.2. Propriétés chimiques due à la fonction amine:

##### 1.3.2.1. Addition de carbonyle: (formation de base de Schiff):

Les acides aminés réagissent avec



#### 1.3.2.2. Arylation:



Le dinitrofluorobenzène (NDFB) forme, avec l'acide aminé N terminal, un dérivé DiNitroPhényl (DNP-Acide aminé) avec libération d'acide fluorhydrique. L'hydrolyse de la protéine libère ensuite le composé dérivé, qui après analyse permet de déterminer l'acide aminé N terminal.

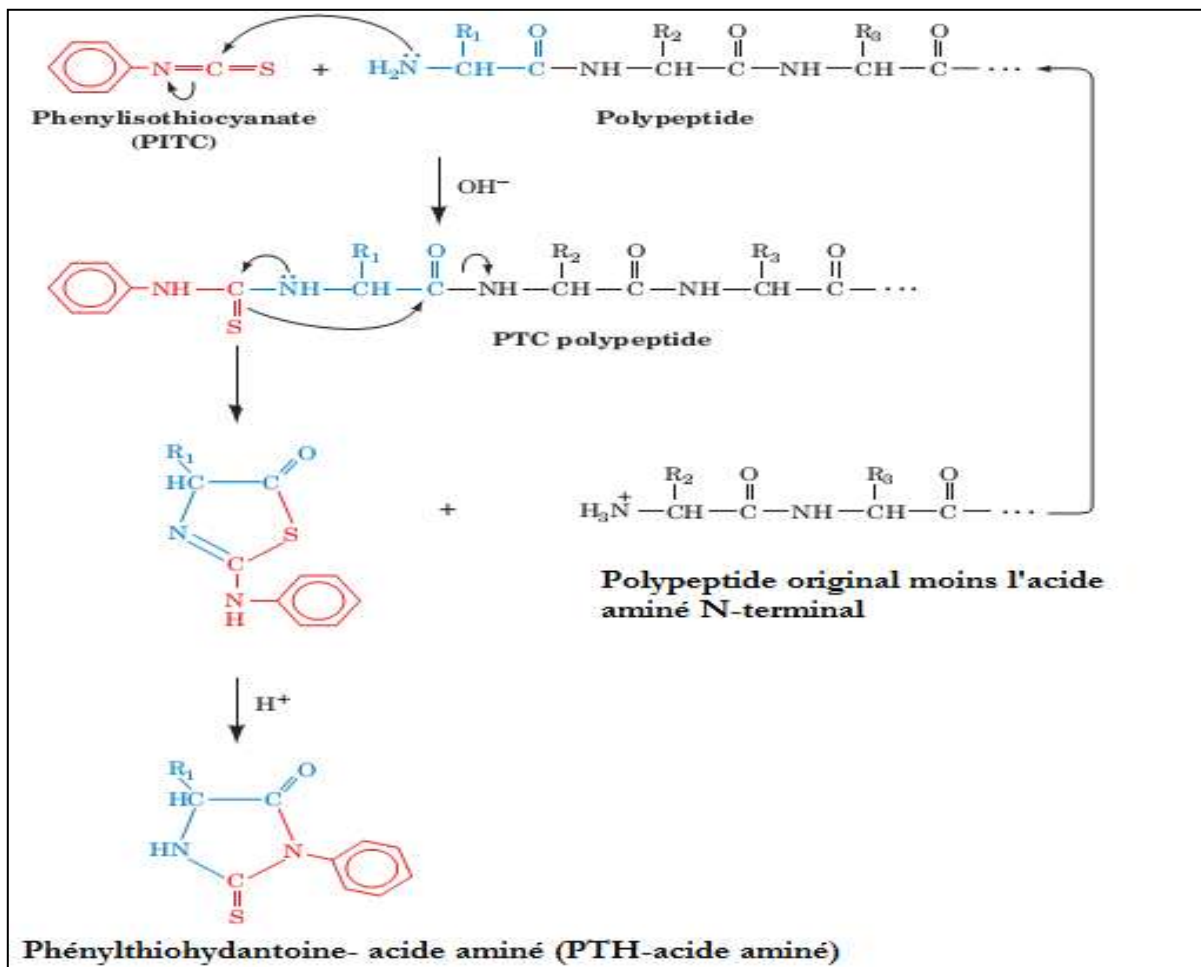
#### 1.3.2.3. Acylation:

La réaction de l'acide aminé N-terminal avec chlorure de dansyle (1-diméthyl-amino-naphtalène-5-sulfonyl) donne un produit (dansyl-amino-acide) plus stable et fluorescent que le DNP. La méthodologie est la même que dans le cas de la méthode de Sanger, mais la réaction est 100 fois plus sensible.

#### 1.3.2.4. Carbamylation:

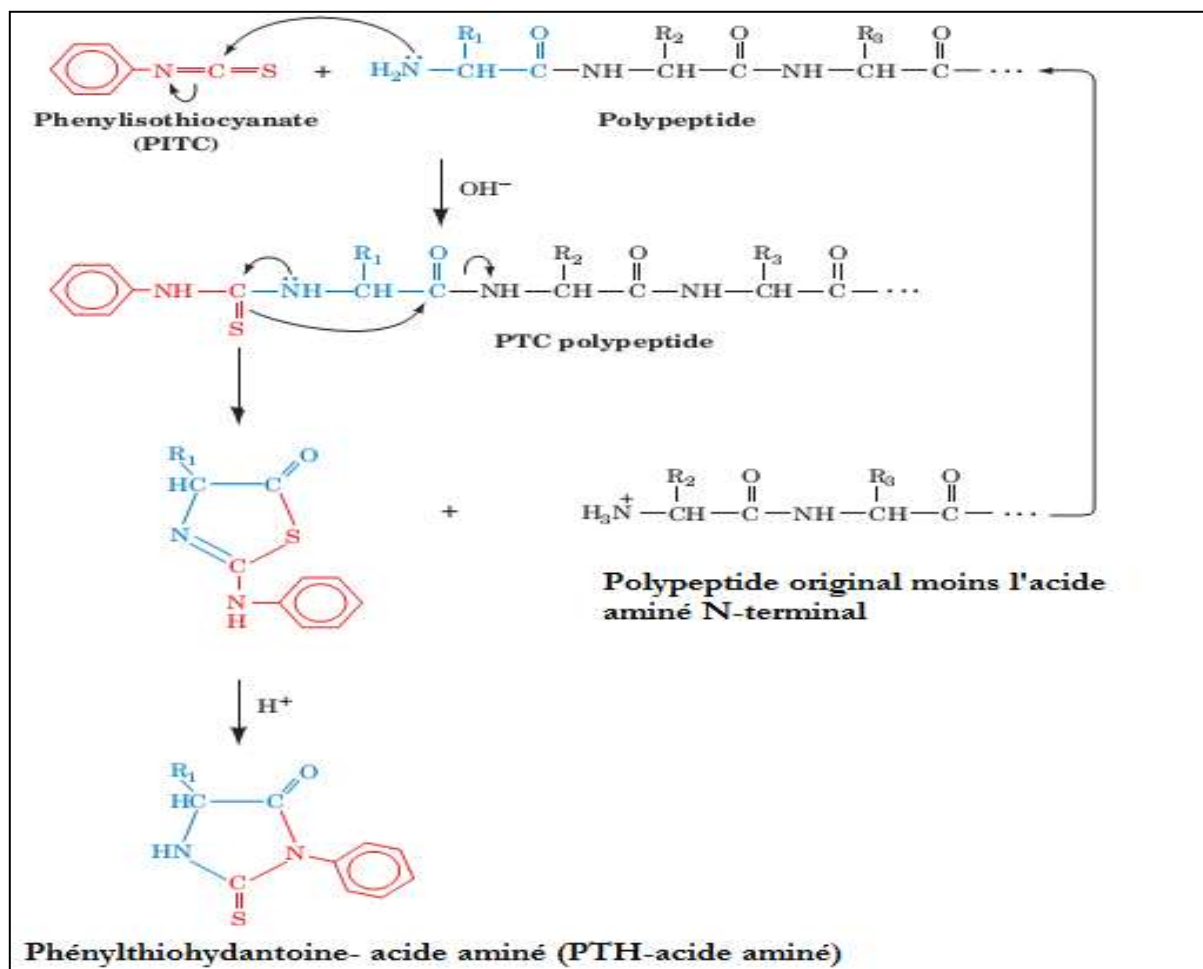
La réaction avec le phénylisothiocyanate (PTC), à un  $\text{pH} \approx 9$ , donne des produits qui absorbent dans la lumière UV et facilement séparable par chromatographie. Cette dégradation est récurrente car elle permet la détermination d'un nombre élevé d'acides aminés tout en conservant la chaîne peptidique.

**Réaction de carbamylation** (Réaction avec le réactif d'Edman (PTC) connue sous le nom de Dégradation d'Edman

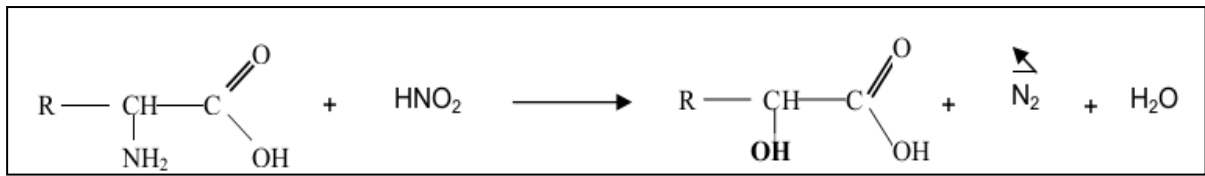




**Réaction de carbamylation** (Réaction avec le réactif d'Edman (PTC) connue sous le nom de  
Dégradation d'Edman

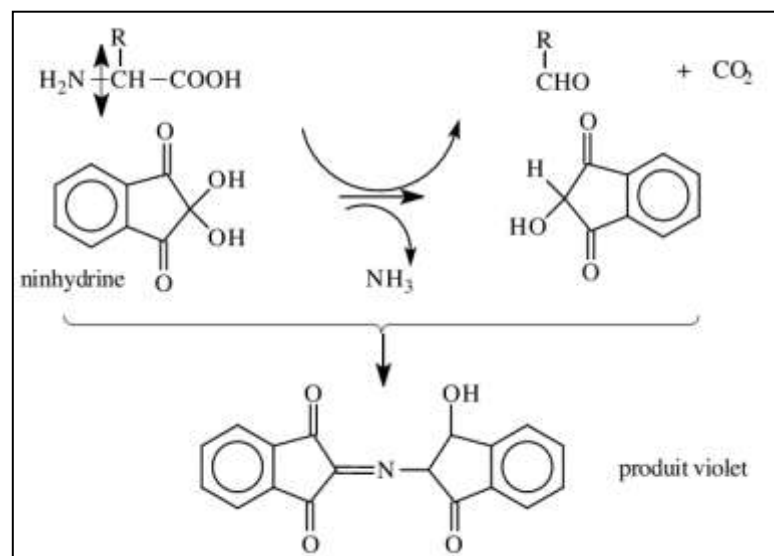


**1.3.2.5. Désamination:** L'acide nitreux réagit sur les acides aminés en libérant du diazote qui peut être dosé.



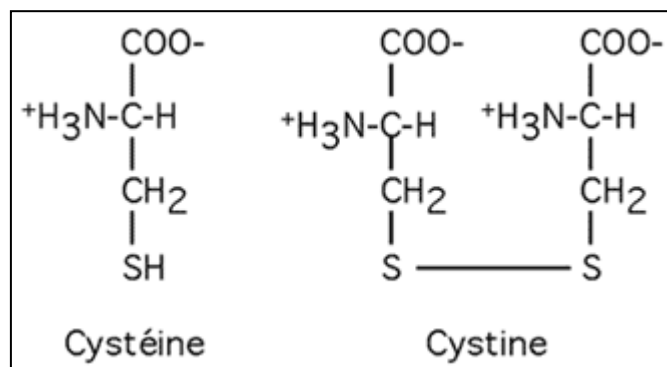
**1.3.3. Propriétés dues aux fonction amine et carboxyle (Réaction avec la ninhydrine):**

Les acides aminés réagissent avec la ninhydrine oxydée pour former un complexe de deux molécules de ninhydrine (réduites) liées par l'azote de l'AA. Ce complexe absorbe fortement à 570 nm environ et la réaction sert au dosage des acides aminés.



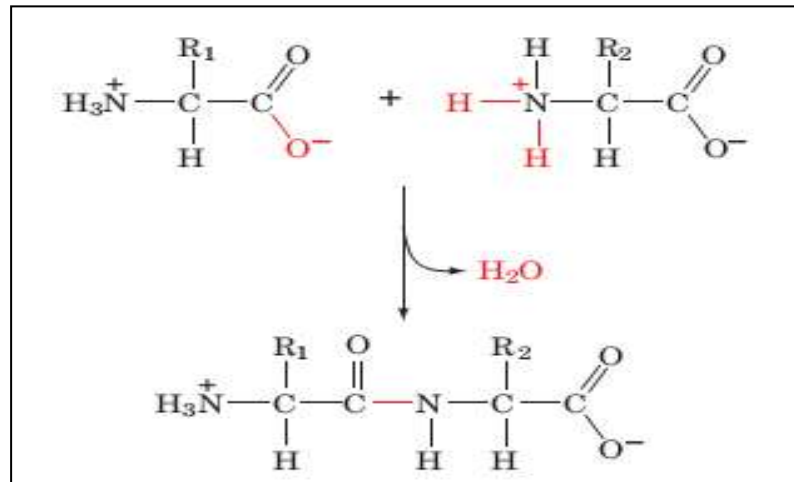
**1.3.4. Réaction des groupements de la chaîne latérale**

➤ **Formation des ponts disulfure :** Les groupements **Thiol** se condense entre deux molécules de cystéine pour former une liaisons connue sous le nom de : **Pont disulfure**, le composé obtenu est la **Cystine**.



**2. Peptides :** Les acides aminés se condensent, par l'élimination d'une molécule d'eau comme indiqué dans la figure. La connexion résultante, est connue sous le nom de **liaison**

**peptidique.** Les polymères composés de deux, de trois, de 3 à 10, et de beaucoup de résidus d'acide aminé sont connus, respectivement, comme dipeptides, tripeptides, oligopeptides, et polypeptides. Ces substances, cependant, sont souvent référées à simplement en tant que peptides. Les protéines sont des molécules qui se composent d'une ou plusieurs chaînes de polypeptide. Ces **polypeptides** s'étendent dans la longueur de 40 à 34.000 résidus d'acide aminé.



**2.1. Nomenclature :** Le nom d'un peptide est obtenu en mettant le suffixe (**-yl**) à la fin du nom de chaque acide aminé, à l'exception de l'acide aminé terminal qui garde son nom original.

**Exemple :** La séquence peptidique suivante : Gly-Meth-Lys-Val-Gly-Ala, aura comme nom :  
**GlycylMéthionylLysylValylGlycylAlanine**

## 2.2. Séquençage des peptides :

Le séquençage des peptides et/ou protéines consiste en la détermination du nombre, la nature, et l'ordre des acides aminés constituant la chaîne peptidique. Ce processus peut être long et compliqué. L'analyse de séquence peut seulement être effectuée sur une protéine pure. Premièrement, la composition en acides aminés est déterminée après hydrolyse acide.

### 2.2.1. Hydrolyse complète :

L'hydrolyse acide (HCl) 6M d'un peptide, à chaud pendant au moins 24 heures, donne un hydrolysât contenant les acides aminés malgré quelques problèmes

- Les acides aminés Tyrosine, thréonine et sérine sont partiellement détruits, alors que la destruction du tryptophane est entière.
- La Glutamine et l'asparagine sont hydrolysées en ammoniac et acides correspondants (acides glutamique et aspartique).

### 2.2.2. Hydrolyse spécifique :

Certains réactifs de nature chimique ou enzymatique ont l'abilité à fragmenter la chaîne peptidique à des endroits spécifiques

### 2.2.2.1. Réactifs :

- Le 2-nitro-5-thiocyanobenzoate (NTCB) hydrolyse la liaison peptidique du côté **amine** de la cystéine.
- Le BrCN « bromure de cyanogène » coupe la liaison peptidique du côté **carboxyle** de la méthionine.

### 2.2.2. Enzymes (endopeptidase) :

Une endopeptidase hydrolyse des liaisons peptidiques **internes** entre deux aminoacides A, (A+1). Il peut être spécifique du résidu en position A ou (A+1). Cette hydrolyse donnera plusieurs fragments peptidiques: si on a **X** coupures (X liaisons peptidiques hydrolysées), le peptide sera dégradé en (x+1) fragments peptidiques. (**Exemple** : 5 coupures donnera 6 fragments).

| Nom                  | Résidu A           | Résidu A+1                   | Spécificité      |
|----------------------|--------------------|------------------------------|------------------|
| <b>Pepsine</b>       | Leu, Phe, Trp, Tyr |                              | Arrêtée si A=Pro |
| <b>Trypsine</b>      | Arg, Lys           |                              |                  |
| <b>Chymotrypsine</b> | Phe, Tyr, Trp      |                              |                  |
| <b>Thermolysine</b>  |                    | Ile, Met, Phe, Trp, Tyr, Val |                  |
| <b>Sa Protéase</b>   | Asp, Glu           |                              |                  |
| <b>Fm protéase</b>   | Pro                |                              |                  |

**Explication** : La trypsine clive exclusivement la liaison entre Lys-X et Arg-X-  
La thermolysine coupe la liaison X-Ile, X-Met, X-Phe, X-Trp, X-Tyr, X-Val.

### 2.2.3. Détermination de la séquence :

#### 2.2.3.1. Groupements terminaux :

##### ➤ Traitement enzymatique avec des exopeptidases :

Ces enzymes n'hydrolysent que la première liaison peptidique (aminopeptidase) ou la dernière liaison peptidique (carboxypeptidase) en libérant l'acide aminé terminal.

| Type                     | Nom                    | Spécificité                           |
|--------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| <b>Carboxypeptidases</b> | Carboxypeptidase A     | Tout acide aminé sauf : Lys, Arg, Pro |
|                          | Carboxypeptidase B     | Tout acide aminé                      |
|                          | Carboxypeptidase C     | Tout acide aminé                      |
|                          | Carboxypeptidase P     | Tout acide aminé sauf : Ser, Gly      |
| <b>Aminopeptidases</b>   | Aminopeptidase M       | Tout acide aminé                      |
|                          | Aminopeptidase K       | Tout acide aminé sauf : Lys, Arg, Pro |
|                          | Leucine aminopeptidase | Tout acide aminé sauf : Pro           |

➤ **Réactifs** : De nombreux réactifs de nature chimique sont utilisés pour déterminer les acides aminés terminaux, parmi ceux-ci on peut citer :

➤ 1-fluoro-2,4-dinitrobenzène (réactif de Sanger) ou 5-diméthylaminonaphtalène-1-sulfonyl chlorure (chlorure de dansyle), ou le Phénylisothiocyanate (Réactif d'Edman) pour déterminer le groupement **N-Terminal**.

➤ L'hydrazine à 100°C hydrolyse toutes les liaisons peptidiques, et libère des hydrazides de tous les AA sauf le **C terminal**, qui se présente comme un AA libre normal. Il est alors facile à isoler et à **identifier**.

### Niveaux d'organisation :

En biochimie, on distingue généralement quatre niveaux d'organisation pour décrire la structure des protéines :

La structure primaire correspond à la séquence en acides aminés.

La structure secondaire décrit l'arrangement des résidus d'acides aminés observable à l'échelle atomique. Stabilisées par des liaisons hydrogène, ces arrangements locaux sont par exemple les hélices  $\alpha$ , les feuilletts  $\beta$ , les tonneaux  $\beta$ , ou les coudes. Il en existe plusieurs variétés, et il est courant qu'une protéine possède globalement plusieurs types de structures secondaires.

La structure tertiaire correspond à la forme générale de la protéine observable à l'échelle de la molécule toute entière. Elle décrit les interactions entre les différents éléments de la structure secondaire. Elle est stabilisée par tout un ensemble d'interactions conduisant le plus souvent à la formation d'un cœur hydrophobe, avec éventuellement des liaisons salines, des liaisons hydrogène, des ponts disulfure, voire des modifications post-traductionnelles. On désigne souvent par structure tertiaire le repliement d'une protéine.

La structure quaternaire décrit le complexe résultant de l'assemblage de plusieurs molécules de protéines (plusieurs chaînes polypeptidiques), appelées dans ce cas sous-unités protéiques, pour former un complexe protéique unique. Toutes les protéines ne sont pas nécessairement constituées de plusieurs sous-unités et ne possèdent par conséquent pas toujours de structure quaternaire.

Les protéines ne sont pas des molécules entièrement rigides. Elles sont susceptibles d'adopter plusieurs conformations apparentées en réalisant leurs fonctions biologiques. La transition d'une de ces conformations à une autre est appelée changement conformationnel.

Dans le cas d'une enzyme par exemple, de tels changements conformationnels peuvent être induits par l'interaction avec le substrat au niveau du site actif. En solution, les protéines subissent également de nombreux changements conformationnels en raison de la vibration thermique de la collision avec d'autres molécules.

### **Structures secondaires :**

La structure secondaire décrit le repliement local de la chaîne principale d'une protéine. L'existence de structures secondaires vient du fait que les repliements énergétiquement favorables de la chaîne peptidique sont limités et que seules certaines conformations sont possibles. Ainsi, une protéine peut être décrite par une séquence d'acides aminés mais aussi par un enchaînement d'éléments de structure secondaire.

De plus certaines conformations se trouvent nettement favorisées car stabilisées par des liaisons hydrogènes entre les groupements amide (-NH) et carbonyle (-CO) du squelette peptidique. Il existe trois principales catégories de structures secondaires selon l'échafaudage de liaisons hydrogènes, et donc selon le repliement des liaisons peptidiques : les hélices, les feuillettes et les coudes.

Il existe des méthodes expérimentales pour déterminer la structure secondaire comme la résonance magnétique nucléaire, le dichroïsme circulaire ou certaines méthodes de spectroscopie infrarouge.

### **Angles dièdres et structure secondaire**

Angles dièdres dans une chaîne protéique. Il existe deux degrés de liberté de rotation, repérés par deux angles  $\phi$  et  $\psi$ . Les liaisons peptidiques sont en jaune et R1 et R2 indiquent les chaînes latérales de deux acides aminés consécutifs.

La chaîne principale contient trois liaisons covalentes par acide aminé. La liaison peptidique étant une liaison plane, il reste deux liaisons simples autour desquelles la rotation est possible. On peut donc déterminer la conformation du squelette d'un acide aminé à partir de deux angles dièdres,  $\phi$  et  $\psi$ .

- L'angle dièdre  $\phi$  est défini par les quatre atomes successifs du squelette : CO-NH-C $\alpha$ -CO, le premier carbonyle étant celui du résidu précédent.
- L'angle dièdre  $\psi$  est défini par les quatre atomes successifs du squelette : NH-C $\alpha$ -CO-NH, le second amide étant celui du résidu suivant.

Toutes les valeurs des angles  $\phi$  et  $\psi$  ne sont pas possibles car certaines conduisent à des contacts trop proches entre atomes qui sont énergétiquement très défavorables. Une étude systématique des combinaisons admissibles d'angles  $\phi$  et  $\psi$  a été réalisée par le biologiste et physicien indien Gopalasamudram Narayana Ramachandran en 1932.

Il a imaginé une représentation sous forme graphique de l'espace ( $\phi, \psi$ ) qui porte aujourd'hui le nom de diagramme de Ramachandran. Ce diagramme montre trois principales zones énergétiquement favorables. Lorsqu'on analyse une structure de protéine, on observe que la majeure partie des acides aminés ont des combinaisons d'angles ( $\phi, \psi$ ) qui s'inscrivent à l'intérieur de ces zones.

Les deux principales régions correspondent aux structures secondaires régulières qui sont principalement observées dans les protéines : la région des hélices  $\alpha$  et celle des feuillets  $\beta$ . La troisième région, plus petite, correspond à une conformation en hélice gauche ( $\phi > 0$ ).

Il y a deux acides aminés particuliers qui font exception à cette règle du diagramme de Ramachandran : la Glycine et la Proline. La glycine ne possède pas de chaîne latérale ( $R=H$ ) et, de ce fait, est beaucoup moins contrainte sur le plan de l'encombrement stérique. Elle peut donc adopter des valeurs ( $\phi, \psi$ ) beaucoup plus diversifiées, en dehors des régions normalement privilégiées. À l'inverse, la proline est plus contrainte: elle contient un cycle pyrrole qui empêche la rotation correspondant à l'angle  $\phi$ .

## **Hélice**

Il y a conformation en hélice lorsque le squelette principal de la protéine adopte un repliement hélicoïdal périodique. Dans l'immense majorité des cas, cette hélice tourne dans le sens horaire. Elle est alors dite « droite ». Inversement, lorsqu'une hélice tourne dans le sens anti-horaire, elle est dite « gauche ».

Il existe aussi des enroulements superhélicoïdaux où 2 hélices, voire plus, s'enroulant l'une autour de l'autre pour former une superhélice. Ce type de conformation, ou faisceau d'hélices (coiled-coil) n'est pas une structure secondaire mais bien un type particulier de structure tertiaire, présent en particulier dans les protéines formant des fibres (e.g. fibrine, kératine, myosine).

### **▲ Hélice $\alpha$**

Structure d'une hélice  $\alpha$ . Les liaisons hydrogène sont figurées en vert. Le squelette principal est montré en tiges épaisses.

L'hélice  $\alpha$  est une structure périodique très fréquente dans le repliement des protéines et des peptides. Elle se caractérise par la formation de liaisons hydrogènes entre le groupement carbonyle  $-CO$  d'un résidu  $i$  et le groupement amide  $-NH$  d'un résidu  $i+4$ . Un tour d'hélice  $\alpha$  moyen contient 3,6 résidus et mesure 0.54 nm, soit une translation de 0.15 nm par résidu. Les angles dièdres  $\phi$  et  $\psi$  de la chaîne peptidique sont en moyenne de  $-57^\circ$  et  $-47^\circ$  dans une hélice  $\alpha$ .

Dans une hélice  $\alpha$ , les chaînes latérales des acides aminés sont localisées en périphérie de l'hélice et pointent vers l'extérieur (voir figure). C'est une structure compacte, énergétiquement favorable.

La structure de l'hélice  $\alpha$  a été prédite par Linus Pauling et Robert Corey en 1951, à partir de considérations théoriques, avant d'être observée effectivement pour la première fois en 1958 dans la myoglobine, la première protéine dont la structure tridimensionnelle a été résolue par cristallographie.

### **▲ Hélice 310**

L'hélice 310 se caractérise par la formation d'une liaison hydrogène entre le groupement  $-CO$  d'un résidu  $i$  et le groupement  $-NH$  d'un résidu  $i+3$ . Un pas d'hélice 310 moyen contient 3 résidus et mesure 0.60 nm, soit une translation de 0.2 nm par résidu. Les angles dièdres  $\phi$  et  $\psi$

des liaisons peptidiques sont en moyenne de  $-49.0^\circ$  et  $-26.0^\circ$ . Le tour d'hélice 310 est donc plus étroit et plus contraint que celui de l'hélice  $\alpha$ . Ce type de conformation est peu fréquent et sa longueur dépasse rarement 1 à 2 tours.

#### ▲ Hélice $\pi$

L'hélice  $\pi$  se caractérise par la formation d'une liaison hydrogène entre le groupement CO d'un résidu  $i$  et le groupement NH d'un résidu  $i+5$ . Un pas d'hélice  $\pi$  moyen contient 4 résidus et mesure 0.50 nm, soit une translation de 0.11 nm par résidu. Les angles dièdres  $\phi$  et  $\psi$  des liaisons peptidiques sont en moyenne de  $-57.1^\circ$  et  $-69.7^\circ$ . Le tour d'hélice  $\pi$  est donc plus large que celui de l'hélice  $\alpha$ . Ce type de conformation est très rare.

#### ▲ Hélice de type II

Les hélices de type II sont des hélices gauches formées par des poly-glycines ou des poly-prolines. Un pas moyen d'hélice de type II contient 3 résidus et mesure 0.93 nm, soit une translation de 0.31 nm par résidu. Les angles dièdres  $\phi$  et  $\psi$  des liaisons peptidiques sont en moyenne de  $-79.0^\circ$  et  $+145.0^\circ$ .

#### Brin et feuillet $\beta$

Le brin  $\beta$  est une structure périodique étendue. Les liaisons hydrogènes qui le stabilisent se font entre résidus distants plutôt qu'entre résidus consécutifs, comme dans le cas de l'hélice  $\alpha$ . En fait, un brin  $\beta$  seul n'est pas stable. Il a besoin de former des liaisons hydrogènes avec d'autres brins  $\beta$  pour se stabiliser. On parle alors de feuillets  $\beta$ . Un brin  $\beta$  est une structure de période 2, dont les chaînes latérales sont situées alternativement au-dessus et en dessous du plan du feuillet. Grossièrement, le brin  $\beta$  peut être vu comme une hélice avec un pas de 2 acides aminés.

Les brins  $\beta$  composant un feuillet ont une polarité, celle de la chaîne peptidique qui va du N-terminal vers le C-terminal. Lors de l'agencement de deux brins adjacents dans un feuillet, deux topologies sont possibles : soit les deux brins ont la même orientation, soit ils ont des orientations opposées. Dans le premier cas, on parle de brins parallèles et dans le dernier de brins anti-parallèles.

Les feuillets  $\beta$  ne sont pas plans, ils présentent un plissement sur leur surface, avec des plis alternativement orientés vers le haut et vers le bas.

On peut distinguer trois grands groupes de protéines en fonction de leur structure tertiaire ou quaternaire : les protéines globulaires, les protéines fibreuses et les protéines membranaires. Presque toutes les protéines globulaires sont solubles et ce sont souvent des enzymes. Les protéines fibreuses jouent souvent un rôle structurel, à l'instar du collagène, constituant principal des tissus conjonctifs, ou de la kératine, constituant protéique des poils et des ongles. Les protéines membranaires sont souvent des récepteurs ou des canaux permettant aux molécules polaires ou électriquement chargées de traverser la membrane. La connaissance de la structure tertiaire, voire quaternaire, d'une protéine peut fournir des éléments importants pour comprendre comment cette protéine remplit sa fonction biologique.



La cristallographie aux rayons X et la spectroscopie RMN sont des méthodes expérimentales courantes pour étudier la structure des protéines, qui peuvent l'une et l'autre fournir des informations avec une résolution à l'échelle atomique. Les données RMN permettent d'obtenir des informations à partir desquelles il est possible d'estimer un sous-ensemble de distances entre certaines paires d'atomes, ce qui permet d'en déduire les conformations possible de cette molécule. L'interférométrie par double polarisation est une méthode analytique quantitative permettant de mesurer la conformation globale de la protéine ainsi que ses changements conformationnels en fonction de son interaction avec d'autres stimulus.

Le dichroïsme circulaire fournit une autre technique de laboratoire permettant de résoudre certains éléments de la structure secondaire des protéines (hélices  $\alpha$  et feuillets  $\beta$  notamment). La microscopie cryoélectronique (en) permet d'obtenir des informations structurales à plus faible résolution sur les très grosses protéines, notamment les virus. La cristallographie électronique (en), technique issue de la précédente, permet dans certains cas de produire également des données à haute résolution, notamment pour les cristaux bidimensionnels de protéines membranaires. Les structures protéiques résolues sont généralement déposées dans la Protein Data Bank (PDB), une base de données en accès libre donnant la structure d'un millier de protéines pour laquelle les coordonnées cartésiennes de chaque atome sont disponibles.

Le nombre de protéines dont la structure a été résolue est bien plus faible que le nombre de gènes dont la séquence est connue. De plus, le sous-ensemble de protéines dont la structure a été résolue est biaisé en faveur des protéines qui peuvent être aisément préparées en vue d'une analyse par cristallographie aux rayons X, l'une des principales méthodes de détermination des structures protéiques. En particulier, les protéines globulaires sont comparativement les plus faciles à cristalliser en vue d'une cristallographie, tandis que les protéines membranaires sont plus difficiles à cristalliser et sont sous-représentées parmi les protéines disponibles dans la PDB<sup>13</sup>.

Pour remédier à cette situation, des démarches de génomique structurale (en) ont été entreprises afin de résoudre les structures représentatives des principales classes de repliement des protéines. Les méthodes de prédiction de la structure des protéines (en) visent à fournir le moyen de générer la structure plausible d'une protéine à partir des structures qui ont pu être déterminées expérimentalement<sup>14</sup>.

Le code génétique établit la correspondance entre un triplet de bases nucléiques, appelé codon, sur l'ARN messager et un acide  $\alpha$ -aminé protéinogène. Cette correspondance est réalisée in vivo par les ARN de transfert, qui sont des ARN comptant une centaine de nucléotides tout au plus et portant un acide aminé esterifiant leur extrémité 3'-OH. Chacun des acides aminés est lié à des ARN de transfert spécifiques, portant des codons eux-aussi spécifiques, de sorte que chacun des 64 codons possibles ne peut coder qu'un seul acide aminé. En revanche, chacun des 22 acides aminés protéinogènes peut être codé par plusieurs codons différents. Ce sont en fait les enzymes réalisant l'estérification des ARN messagers avec les acides aminés — les aminoacyl-ARNt synthétases — qui maintiennent le code

génétique : en effet, ces enzymes se lient spécifiquement à la fois à un ARN de transfert donné et à un acide aminé donné, de sorte que chaque type d'ARN de transfert n'est estérifié que par un acide aminé spécifique.

Le cas de la sélénocystéine et de la pyrrolysine est quelque peu différent en ce que ces acides aminés particuliers ne sont pas codés directement par des codons spécifiques mais par recodage traductionnel de codons stop en présence de séquences d'insertions particulières appelées respectivement élément SECIS et élément PYLIS, qui recodent les codons stop UGA (Opale) et UAG (Ambre) respectivement en sélénocystéine et en pyrrolysine.

De surcroît, la sélénocystéine n'est pas liée telle quelle à son ARN de transfert, car elle est trop réactive pour exister librement dans la cellule sans l'endommager ; c'est en fait la sérine qui est liée à un ARN de transfert de sélénocystéine ARNtSec par la sérine-ARNt ligase. Le séryl-ARNtSec ne peut être utilisé par les ribosomes car il n'est pas reconnu par les facteurs d'élongation intervenant au cours de la biosynthèse des protéines, de sorte que la sérine ne peut être incorporée dans les sélénoprotéines à la place de la sélénocystéine.

En revanche, le séryl-ARNtSec est un substrat pour certaines enzymes qui assurent sa conversion en sélénocystéinyl-ARNtSec : conversion directe par la sélénocystéine synthase<sup>15</sup> chez les bactéries, conversion indirecte via l'O-phosphoséryl-ARNtSec successivement par la O-phosphoséryl-ARNtSec kinase<sup>16</sup> et la O-phosphoséryl-ARNt:sélénocystéinyl-ARNt synthase<sup>17</sup> chez les archées et les eucaryotes.

Les gènes codés dans l'ADN sont tout d'abord transcrits en ARN pré-messager par des enzymes telles que les ARN polymérases. La plupart des êtres vivants modifient cet ARN pré-messager à travers un ensemble de processus appelés modifications post-transcriptionnelles conduisant à l'ARN messenger mature. Ce dernier est alors utilisable par les ribosomes pour servir de modèle lors de la biosynthèse des protéines. Chez les procaryotes, l'ARN messenger peut être utilisé dès qu'il est synthétisé ou être traduit en protéines après avoir quitté le nucléoïde. En revanche, chez les eucaryotes, l'ARN messenger est produit dans le noyau de la cellule tandis que les protéines sont synthétisées dans le cytoplasme, de sorte que l'ARN messenger doit traverser la membrane nucléaire.

### **Biosynthèse des protéines :**

La biosynthèse des protéines est un ensemble de processus biochimiques permettant aux cellules de produire leurs protéines. Elle recouvre les étapes de transcription de l'ADN en ARN messenger, d'aminocyclation des ARN de transfert, de traduction de l'ARN messenger en chaînes polypeptidiques, de modifications post-traductionnelles de ces dernières, et enfin de repliement des protéines ainsi produites. Elle compense la perte de protéines par sécrétion ou par dégradation. Elle est étroitement régulée à de multiples niveaux, et possède des mécanismes de correction d'erreur.

Le matériel génétique des cellules est constitué d'ADN sur lequel l'information génétique est organisée en gènes, ou cistrons, et encodée sous forme de codons consécutifs de trois résidus

nucléotidiques chacun, chaque codon correspondant à un acide aminé précis : la correspondance entre codons et acides aminés constitue le code génétique. La biosynthèse des protéines consiste à synthétiser une chaîne polypeptidique dont la séquence peptidique est déterminée par la séquence nucléotidique — et donc la succession des codons — du gène correspondant. Pour ce faire, l'ADN est tout d'abord transcrit en ARN messager.

Chez les eucaryotes, cet ARN messager subit une série de modifications post-transcriptionnelles — ajout d'une coiffe, polyadénylation, épissage — puis gagne le cytoplasme à travers les pores nucléaires. Parallèlement, dans le cytoplasme, les acides aminés sont activés chacun sur leur ARN de transfert par leur aminoacyl-ARNt synthétase spécifique : il existe un type d'ARN de transfert et une aminoacyl-ARNt synthétase pour chacun des différents acides aminés protéinogènes. Chaque ARN de transfert possède un anticodon, composé de trois nucléotides formant une séquence complémentaire du codon d'ARN messager : c'est cette spécificité qui assure la correspondance entre acides aminés codons de l'ARN messager.

Une fois dans le cytoplasme, les ARN messagers sont lus séquentiellement par des organites spécialisés appelés ribosomes, qui sont des complexes d'ARN ribosomique et de plus d'une cinquantaine de protéines différentes. Ces ribosomes assemblent les acides aminés au fur et à mesure qu'ils parcourent les codons de l'ARN messager, ce qui correspond à la traduction génétique : les aminoacyl-ARNt se lient séquentiellement aux codons de l'ARN messager par leur anticodon, et le ribosome catalyse la formation d'une liaison peptidique entre la chaîne polypeptidique naissante et le dernier acide aminé apporté par l'ARN de transfert interagissant avec l'ARN messager.

De cette façon, la séquence peptidique des protéines reproduit fidèlement la séquence nucléotidique des gènes exprimés. Chez les eucaryotes, la traduction de l'ARN messager en protéines par les ribosomes se déroule dans le réticulum endoplasmique rugueux. Elle est éventuellement suivie de modifications post-traductionnelles, comme la glycosylation (liaison covalente d'oses à une protéine) dans l'appareil de Golgi. Chez les procaryotes, la transcription de l'ADN en ARN messager et la traduction de ce dernier en protéines ont lieu dans le cytoplasme et peuvent être simultanées, la traduction débutant alors que la transcription n'est pas encore achevée. Cette simultanéité donne lieu à un important type de régulation de la traduction.

Les protéines fonctionnelles sont le plus souvent synthétisées directement à partir des gènes par traduction d'un ARN messager. Cependant, lorsqu'une protéine doit être produite très rapidement ou en grande quantité, c'est tout d'abord un précurseur protéique qui est produit par l'expression du gène. On appelle proprotéine une protéine inactive possédant un ou plusieurs peptides inhibiteurs ; elle peut être activée pour donner une protéine fonctionnelle en clivant ce peptide inhibiteur par protéolyse lors d'une modification post-traductionnelle. Une préprotéine est une forme contenant un peptide signal à son extrémité N-terminale qui spécifie son insertion dans où à travers une membrane et la désigne pour être sécrétée. Ce peptide

signal est clivé dans le réticulum endoplasmique. Les préproprotéines possèdent à la fois un peptide signal et un peptide inhibiteur.

### **Protéines structurelles**

Les protéines structurelles confèrent raideur et rigidité à des constituants biologiques qui, sans elles, seraient fluides. La plupart des protéines structurelles sont fibreuses. C'est par exemple le cas du collagène et de l'élastine qui sont des constituants essentiels de tissus conjonctifs tels que le cartilage, et de la kératine présente dans les structures dures ou filamenteuses telles que les poils, les ongles, les plumes, les sabots et l'exosquelette de certains animaux. Certaines protéines globulaires peuvent également jouer un rôle structurel, par exemple l'actine et la tubuline dont les monomères sont globulaires et solubles mais polymérisent pour former de longs filaments rigides constituant le cytosquelette, ce qui permet à la cellule de maintenir sa forme et sa taille.

Les protéines motrices sont des protéines structurelles particulières qui sont capables de générer des forces mécaniques. Ce sont par exemple la myosine, la kinésine et la dynéine. Ces protéines sont essentielles à la motilité des organismes unicellulaires ainsi qu'aux spermatozoïdes des organismes multicellulaires. Elles permettent également de générer les forces à l'œuvre dans la contraction musculaire et jouent un rôle essentiel dans le transport intracellulaire.

### **Fonctions des protéines :**

Les protéines remplissent ainsi des fonctions très diverses au sein de la cellule et de l'organisme:

- ✚ **Protéines structurelles**, qui permettent à la cellule de maintenir son organisation dans l'espace, et qui sont les constituants du cytosquelette ;
- ✚ **Protéines de transport**, qui assurent le transfert des différentes molécules dans et en dehors des cellules ;
- ✚ **Protéines régulatrices**, qui modulent l'activité d'autres protéines ou qui contrôlent l'expression des gènes ;
- ✚ **Protéines de signalisation**, qui captent les signaux extérieurs, et assurent leur transmission dans la cellule ou l'organisme ; il en existe plusieurs sortes, par exemple les protéines hormonales, qui contribuent à coordonner les activités d'un organisme en agissant comme des signaux entre les cellules ;
- ✚ **Protéines réceptrices**, qui détectent les molécules messagères et les autres signaux pour que la cellule agisse en conséquence ;
- ✚ **Protéines sensorielles** détectent les signaux environnementaux (ex. : lumière) et répondent en émettant des signaux dans la cellule ; les récepteurs d'hormone détectent les hormones et envoient des signaux à la cellule pour qu'elle agisse en conséquence (ex. : l'insuline est une hormone qui, lorsqu'elle est captée, signale à la cellule d'absorber et d'utiliser le glucose) ;

- ✚ **Protéines motrices**, permettant aux cellules ou organismes ou à certains éléments (cils) de se mouvoir ou se déformer (ex. : l'actine et la myosine permettent au muscle de se contracter) ;
- ✚ **Protéines de défense**, qui protègent la cellule contre les agents infectieux (ex. : les anticorps) ;
- ✚ **Protéines de stockage**, qui permettent la mise en réserve d'acides aminés pour pouvoir biosynthétiser d'autres protéines (ex. : l'ovalbumine, la principale protéine du blanc d'œuf permet leur stockage pour le développement des embryons de poulet) ; les enzymes, qui modifient la vitesse de presque toutes les réactions chimiques dans la cellule sans être transformées dans la réaction.

### Propriétés physico-chimiques des protéines :

#### ✚ **Dénaturation des protéines :**

Une protéine est dénaturée lorsque sa conformation tridimensionnelle spécifique est changée par rupture de certaines liaisons sans atteinte de sa structure primaire. Il peut s'agir, par exemple, de la désorganisation de zones en hélice  $\alpha$ . La dénaturation peut être réversible ou irréversible. Elle entraîne une perte totale ou partielle de l'activité biologique. Elle produit très souvent un changement de solubilité de la protéine.

Les agents de dénaturation sont nombreux :

- **Agents physiques** : température, radiations, pH ;
- **Agents chimiques** : solution d'urée qui forme de nouvelles liaisons hydrogène dans la protéine, solvants organiques, détergents.

#### ✚ **Solubilités :**

Les relations des protéines avec l'eau sont complexes. La structure secondaire des protéines dépend dans une large mesure de l'interaction des liaisons peptidiques avec l'eau par l'intermédiaire de liaisons hydrogène. Des liaisons hydrogène se forment également soit entre radicaux de la protéine (structures alpha et bêta) soit entre ses radicaux hydrophiles libres et l'eau. Les protéines riches en pelote statique sont donc a priori plus solubles que les structures hélicoïdales.

Au niveau de la structure tertiaire, l'eau provoque l'orientation des chaînes et radicaux hydrophiles vers l'extérieur de la molécule, alors que les chaînes et radicaux hydrophobes ont tendance à réagir entre eux à l'intérieur de la molécule (cf. effet hydrophobe). La solubilité des protéines dans une solution aqueuse contenant des sels dépend de deux effets antagonistes liés d'une part aux interactions électrostatiques ("salting in" ou effet dissolvant), et d'autre part aux interactions hydrophobes (salting out ou effet relargant).

A basse force ionique, la solubilité des protéines augmente lorsque la concentration en sels croît, jusqu'à un certain seuil. Au delà, elle diminue avec l'addition de sels. L'augmentation de solubilité (salting in) est liée à l'action des forces électrostatiques la diminution de solubilité (salting out) est attribuée à différentes interactions rassemblées sous le nom "d'interactions hydrophobes", sans que ce terme implique un mécanisme précis.

Influence du pH : la solubilité est minimale au pH isoélectrique.

### **Poids et masse moléculaire**

C'est une caractéristique fondamentale de chaque protéine. Elle se définit par deux expressions équivalentes qui doivent être distinguées :

le poids moléculaire ou masse moléculaire relative (symbole  $M_r$ ) est sans dimension; la masse moléculaire (symbole  $m$ ), généralement exprimée en daltons (Da) pour les protéines.

Pour les protéines, on utilise souvent le  $M_r$ . Cette caractéristique est estimée par diverses méthodes, par exemple :

La filtration sur gel, ou chromatographie d'exclusion stérique. Des billes de polysides à liaisons croisées ou un polymère artificiel forment dans l'eau un gel fonctionnant comme un tamis moléculaire traversé rapidement par les grosses molécules, lentement par les petites qui pénètrent le gel. Le principe est simple : après avoir étalonné la colonne avec des protéines de poids moléculaire connu, il existe ensuite une relation linéaire entre le volume d'élution et le logarithme du poids moléculaire.

L'électrophorèse sur un gel de polyacrylamide en gradient. Des résultats voisins de ceux de la filtration sur gel sont obtenus grâce à des gels d'électrophorèse de porosité décroissante dans lesquels les protéines se trouvent progressivement bloquées en fonction de leur poids moléculaire.

Le poids moléculaire des protéines varie de quelques milliers à 1 million ou plus.

### **Propriétés électriques**

#### ▪ **Caractère amphotère**

La liaison peptidique n'est pas chargée aux pH présentant un intérêt physiologique. En effet à de tels pH la formation de peptides à partir de leurs acides aminés constitutifs s'accompagne d'une perte nette d'une charge positive et d'une charge négative par liaison peptidique formée. Cependant, les peptides sont des molécules porteuses de charges au pH physiologique à cause des charges sur les groupements C et N terminaux et sur les groupements fonctionnels des carbones alpha des acides aminés polaires.

La charge varie avec le pH : en milieu acide, les protéines s'ionisent comme des bases et sont chargés positivement. En milieu alcalin, elles forment des anions.

Il existe un point de pH pour lequel les charges + et - sont équivalentes, la charge nette étant donc nulle ; c'est le point isoélectrique, ou  $pH_i$ , de la protéine qui alors ne se déplace plus dans un champ électrique.

#### ▪ **Mobilité électrophorétique - électrophorèse - électrofocalisation**

Soumises à un champ électrique, les protéines se déplacent plus ou moins suivant leur charge : c'est la mobilité électrophorétique qui permettra donc, s'il y a un mélange de protéines de les séparer par électrophorèse. C'est un procédé très classique de fractionnement des protéines qui peut être soit seulement analytique soit aussi préparatif. Elle est généralement réalisée sur des supports : acétate de cellulose, gel de gélose, gel de polyacrylamide. L'électrophorèse de zone est très couramment utilisée en biologie clinique pour séparer les protéines du sérum sanguin.

L'isoélectrofocalisation (IEF) repose sur la propriété des molécules amphotères comme les protéines d'être chargées positivement si le pH est plus acide que leur pHi, négativement si le pH est plus basique que leur pHi. On peut appliquer au support porteur du gradient de pH un champ électrique tel que le pôle + ou anode sont à la borne acide et le pôle - ou cathode à la borne basique. Si la molécule amphotère est neutre, elle restera immobile. Si elle est au départ chargée négativement, elle sera repoussée par la cathode et rejoindra sous l'effet du champ électrique son pHi. Si elle est chargée positivement, repoussée par l'anode, elle rejoindra également son pHi. Ainsi, quel qu'ait été le point de départ de la protéine dans ce gradient de pH soumis à un champ électrique, elle se trouvera focalisée, concentrée à son pHi. Ces conditions sont réalisées par l'utilisation d'un mélange de molécules amphotères de faible masse molaire (ou ampholytes) dont les pH isoélectriques couvrent la zone de pH choisie.

### Exemples de protéines

#### ❖ Histones :

Les **histones** sont des protéines globulaires à caractère basique dû à la présence de forte proportion de lysine et d'arginine. On les rencontre associées aux ADN du noyau des cellules somatiques (cellules qui ne concerne pas la reproduction). Les **histones** sont solubles dans l'eau et non coagulables par la chaleur. Leur point isoélectrique (PI) est compris entre 10 et 12.

#### ❖ Protamines :

Les **protamines** sont des protéines de faible poids moléculaire, riches en acides aminés basiques de type arginine et ne contiennent ni soufre ni acides aminés aromatiques. Elles se trouvent associées aux ADN des poissons et des végétaux. Les **protamines** sont solubles dans l'eau et non coagulables par la chaleur. Leur PI est compris entre 10 et 12.

#### **Prolamines et gluténines**

Les **prolamines** et les **gluténines** sont des **protéines** spécifiques aux végétaux et sont rencontrés particulièrement dans les grains de céréales où elles constituent une partie des **substances protéiques de réserve**.

Les **prolamines** sont riches en proline, en aspartate et en glutamate, mais pauvres en lysine et en tryptophane. Leur richesse relative en coline leur attribue la propriété de solubilité dans l'alcool à 70%. La **zéine de maïs**, la **gliadine de blé** et l'**hordéine de l'orge** sont, par exemple, des **prolamines**. Grâce à leurs structures spiralées et élastiques, ces protéines apportent aux produits de boulangerie du moelleux et une excellente cuisson. Les protéines de la famille des **prolamines** constituent la **fraction toxique** chez les **intolérants au gluten** et principalement l'**alpha-gliadine** qui est présente dans le froment.

Les gluténines ont une composition voisine à celle des prolamines et se distinguent par les proportions contenues en glutamate (un peu moindre dans les gluténines) et en lysine (un peu élevée dans les gluténines). Elles sont insolubles dans l'eau, mais solubles dans les acides et alcalins dilués.

Le gluten (la masse protéique élastique restante après extraction de l'amidon du blé) qui est le constituant principale de la partie protéique des céréales (85% de la quantité des protéines du blé) et un facteur de leur aptitude à la panification, est constitué de ces deux protéines : prolamines et gluténines.

#### ❖ Albumines et globulines

Les albumines et les globulines sont des protéines globulaires (sphéroprotéines) qui se trouvent, aussi bien chez les animaux que chez les végétaux.

Les albumines sont riches en acides glutamique (glutamate), en acide aspartique (aspartate), en lysine et en leucine, mais pauvres en tryptophane. Elles ont un poids moléculaire compris entre 50.000 et 100.000 et un point isoélectrique situé dans la zone acide ( $PI < 7$ ). Les albumines sont solubles dans l'eau, coagulables par la chaleur et précipitent par addition de sulfate d'ammonium entre 66% et 100% de saturation. L'ovalbumine du blanc d'oeuf, le lactalbumine du lait et la léguméline des légumineuses sont, par exemple, des albumines.

Les globulines sont des protéines qui contiennent toute la série des acides aminés et sont particulièrement riche en glutamate et en aspartate. Les globulines sont insolubles dans l'eau pure mais solubles dans les solutions salines diluées. Elles précipitent par addition de sulfate d'ammonium à 50% de saturation. Ce sont souvent des glycoprotéines ou des lipoprotéines. L'ovoglobuline du blanc d'oeuf et le lactoglobuline du lait sont, par exemple, des globulines.

#### ❖ Caséines

La caséine est une phosphoprotéine riche en lysine (l'un des acides aminés essentiels). Dans le lait, elle se présente sous forme de phosphocaséinate de calcium et représente environ 80% de sa matière protéique et y est présente sous la forme de microparticules en suspension, encore appelées micelles. La caséine est coagulable en milieu acide et par la présure. C'est à la caséine que l'on doit le caillé des fromages (action des ferments et de la présure) et des yaourts (actions des ferments).

À l'état sec, la caséine se présente sous forme d'une poudre blanche, amorphe, insipide et inodore. La caséine se dissout peu dans l'eau, largement dans les solutions alcalines ou dans les acides fort.

#### ❖ Fibroïnes

La fibroïne est une protéine fibreuse riche en glycine et en alanine, mais aussi en sérine et en tyrosine. On la trouve, par exemple, dans la soie et la toile d'araignée.

#### ❖ Kératines

La kératine est une protéine résistante et fibreuse, riche en proline et en cystéine, constituant le matériau principal des téguments (tissus externes de revêtement, comme la peau) et des phanères (productions des épidermes, comme les poils, les ongles, les écailles, les plumes, le bec, les cornes et les sabots) des animaux.

#### ❖ Collagènes

Le collagène est la protéine la plus abondante chez les vertébrés. Il se trouve dans les os, la peau, les tendons et les cartilages. Sa molécule contient habituellement trois longues chaînes



polypeptidiques, composées chacune d'environ mille acides aminés. Ces chaînes s'enroulent en une triple hélice régulière, responsable de l'élasticité de la peau et des tendons.

En solution aqueuse et sous l'action du chauffage, le collagène se transforme en gélatine. La gélatine est une substance soluble dans l'eau et donne une solution visqueuse. Outre son utilisation comme colle, la gélatine est utilisée comme gélifiant dans les industries agroalimentaires.

### **Dégradation des protéines**

Contrairement à la dénaturation qui n'affecte que les structures quaternaire, tertiaire et secondaire des protéines ; la dégradation quant à elle touche la structure primaire des protéines et aboutit par conséquent à la formation d'autres produits, parfois indésirables. La dégradation des protéines peut être de nature chimique ou enzymatique.

#### **➤ Dégradation chimique des protéines**

La dégradation chimique des protéines peut se produire au cours des processus technologiques ou de préparations culinaires. Les dégradations les plus connues sont :

**Formation d'isopeptides** : par chauffage de ponts intramoléculaires ou intermoléculaires entre les fonctions amine-terminal de la lysine et acide-terminal de la glutamine/asparagine. La conséquence de cette réaction est la perte de digestibilité.

**Formation de lysinoalanine** : par substitution de la fonction OH de la sérine, ou SH de la cystéine, par la fonction amine-terminal de la lysine suite à un chauffage en milieu basique (blanc d'oeuf cuit). La conséquence de cette réaction est la diminution de la valeur nutritive à cause de la formation d'acides aminés anormaux.

**Réaction de Maillard** : Réaction entre un sucre réducteur et un groupement aminé. Cette réaction est la responsable principale de la production des odeurs, des arômes et des pigments caractéristiques des aliments cuits. Elle peut aussi donner naissance à des composés cancérigènes et également réduire la valeur nutritionnelle des aliments en dégradant les acides aminés essentiels. La réaction de Maillard est développée dans la partie relative aux réactions d'altération chimique des aliments.

#### **➤ Dégradation enzymatique des protéines**

La dégradation enzymatique des protéines peut intervenir au cours du processus de dégradation biologique des aliments tel que la fermentation ou la putréfaction. Les plus importantes dégradations enzymatiques des protéines sont : la formation d'alcools supérieurs et la formation d'amines biogènes.

#### **➤ Formation d'alcools supérieurs**

La dégradation des protéines en alcools supérieurs est un processus enzymatique qui intervient lors de la fermentation alcoolique des fruits, céréales, pommes de terre, etc. La distribution des alcools supérieurs formés est en partie une image de la distribution des acides aminés disponibles. Par exemple, pour la production des eaux de vie, les levures utilisent les acides aminés comme source d'azote ; cette activité conduit à la formation d'alcools supérieurs

qui interviennent dans la fraction aromatique des eaux de vie et sont analysés pour l'authentification de ces produits.

#### Formation des amines biogènes

La formation des amines biogènes intervient lors de la dégradation microbienne des denrées riches en protéines (putréfaction des viandes/poissons, maturation des fromages, fermentations diverses). Cette réaction de décarboxylation d'acides aminés est catalysée par des enzymes (décarboxylases) présentes chez certaines bactéries (*Proteus morganii*, *Escherichia coli*, *Lactobacillus bulgaris*, ...).

#### ➤ Dégradation des protéines en amines biogènes

Les amines biogènes sont responsables de plusieurs intoxications alimentaires. La plus dangereuse est l'intoxication scombroidique due à l'ingestion des produits, notamment les poissons, contenant des doses élevées en histamine. C'est pourquoi la teneur en histamine des poissons est réglementée et doit être contrôlée pour éviter ce type d'intoxication chez le consommateur.

L'histamine se développe dans la chair de plusieurs espèces de poisson suite à la décarboxylation de l'histidine. Cette réaction de décarboxylation est catalysée par l'enzyme histidine-décarboxylase. L'histamine est aussi présente naturellement dans divers types d'aliments comme les tomates et les épinards.

#### Qualité nutritionnelle des protéines

Les protéines alimentaires sont souvent qualifiées de haute ou de basse qualité nutritionnelle en fonction de leur profil en acides aminés. Les protéines de haute qualité nutritionnelle contiennent les 9 acides aminés essentiels dont les proportions sont suffisantes pour couvrir les besoins de l'espèce humaine. Les protéines de qualité moindre sont déficitaires en un ou plusieurs des neuf acides aminés essentiels qui doivent donc être apportés par le reste de l'alimentation.

#### Propriétés fonctionnelles des protéines alimentaires

Les protéines ont un rôle majeur dans les qualités organoleptiques de nombreux aliments frais ou manufacturés, comme par exemple la consistance et la texture de la viande et produits carnés, du lait et dérivés, des pâtes et du pain. Ces qualités des aliments dépendent très fréquemment de la structure et des propriétés physico-chimiques des composants protéiques ou tout simplement des propriétés fonctionnelles des protéines.

Le terme « propriété fonctionnelle » appliqué aux ingrédients alimentaires est défini comme toute propriété non nutritionnelle qui influence l'utilité d'un ingrédient dans un aliment. Les diverses propriétés vont contribuer pour aboutir aux caractéristiques désirées de l'aliment. Quelques unes des propriétés fonctionnelles des protéines sont : la solubilité, l'hydratation, la viscosité, la coagulation, la texturation, la formation de pâte, les propriétés émulsifiante et moussante.

### **La propriété de solubilité des protéines**

La solubilité des protéines est leur capacité de se dissoudre dans l'eau. Cette solubilité est fonction du pH, de la force ionique et de la température du milieu. La solubilité des protéines est minimale dans une zone de pH située autour de leur point isoélectrique (PI). Cette propriété est exploitée pour la préparation des isolats protéiques d'un aliment, par précipitation isoélectrique. La solubilité des protéines diminue lors des traitements thermiques. Cette perte de solubilité a des conséquences majeures sur les propriétés moussantes et émulsifiantes des protéines. La solubilité des protéines gagne en importance lorsque la clarté du produit, comme dans les boissons, est capitale.

### **La propriété d'hydratation des protéines : Rétention de l'eau**

La propriété d'hydratation d'une protéine concerne sa capacité à absorber de l'eau. L'absorption et la rétention de l'eau par les ingrédients protéiques jouent un rôle majeur dans la qualité et la texture de divers aliments.

L'absorption de l'eau est influencée par la présence de groupements ionisables, le pH, la présence de sels et la température. La composition en acides aminés influence également la capacité des protéines à absorber de l'eau. Les groupements polaires des protéines (carboxyl, hydroxyl et thiol) ont tendance à lier facilement les molécules d'eau, ce qui contribue à leur capacité d'absorption des molécules d'eau. Au PI, la capacité des protéines à absorber des molécules d'eau est minimale puisque la charge nette de la protéine est nulle. Une faible concentration en sel dans le milieu améliore l'absorption de l'eau ; toutefois, une forte concentration la diminue.

L'absorption de l'eau étant un phénomène exothermique, l'augmentation de la température diminue l'absorption de l'eau. L'absorption de l'eau des protéines est spécialement importante dans les aliments comme les breuvages, les soupes et les saucisses puisqu'elle joue un rôle déterminant sur la texture (viscosité, gélification) de ces aliments.

### **La propriété de viscosité des protéines**

La viscosité d'une solution protéique est sa propriété qui tend à empêcher son écoulement lorsqu'elle est soumise à l'application d'une force. Les solutions de grande viscosité résistent à l'écoulement et les solutions de faible viscosité s'écoulent facilement.

Des variations de pH, de température et de force ionique peuvent modifier la viscosité des solutions protéiques. Toutefois, elle augmente en milieu alcalin parce que les charges électriques négatives entraînent un dépliement et une élévation maximale de la protéine. Ce phénomène joue un rôle important dans les aliments liquides tels que les boissons, potages, sauces et crèmes.

### **La propriété de coagulation des protéines**

Quand des molécules dénaturées s'aggrègent pour former un réseau protéique ordonné, le phénomène est appelé coagulation ou encore, gélification. La coagulation des protéines est obtenue sous l'action d'agents physiques (température, agitation, ...) et chimiques (pH, enzymes, ...). L'action de ces agents sur les protéines aboutit à la modification de leur structure et favorise la formation des ponts disulfures entre leurs acides aminés soufrés : c'est

la coagulation. Le réseau protéique ainsi formé emprisonne, entre ses mailles, l'eau contenue dans l'aliment ce qui donne à l'aliment son aspect consistant : c'est le gel ou le coagulum.

La propriété de coagulation des protéines est exploitée dans la cuisson des aliments (oeufs, viandes, ...) et dans la préparation de nombreux autres produits : les gels protéiques de soja (exemple : tofu), les yaourts, les fromages. Elle est aussi exploitée pour améliorer l'absorption d'eau (épaississement) et pour stabiliser les émulsions et les mousses.

### **La propriété de texturation des protéines**

Les protéines constituent la base de la structure et de la texture de plusieurs aliments. Il existe des procédés de texturation qui conduisent à des structures fibreuses ou en forme de film possédant une texture masticable et une bonne capacité de rétention d'eau. Les protéines texturées possèdent certaines propriétés physiques des viandes et peuvent donc les remplacer, au moins en une partie (charcuterie, hamburger, etc.).

### **La propriété de formation de la pâte**

Au cours du pétrissage de la farine de certaines céréales, tel que le blé, on assiste à la formation d'une pâte extensible (propriété des prolamines) et élastique (propriété des gluténines) : c'est la propriété de formation de la pâte. Cette propriété est exploitée essentiellement dans la fabrication du pain et des biscuits.

### **La propriété émulsifiante des protéines**

Le caractère amphiphile des protéines leur confère la propriété d'être de bons agents tensio-actifs et elles sont donc utilisées pour stabiliser les phases huile/eau d'une émulsion. De nombreux produits alimentaires sont des émulsions (lait, crèmes, glaces, ...) et les constituants protéiques jouent un rôle prépondérant dans leur stabilisation.

Les facteurs comme la concentration en protéines, le pH, la solubilité des protéines, la présence de sels ou d'autres solutés de même que la température influencent les propriétés émulsifiantes des protéines.

### **La propriété moussante des protéines**

Sous l'action du battage d'une solution protéique, les molécules de protéines se dénaturent, se déroulent et emprisonnent de l'air. Cette opération conduit à la formation d'une mousse (dispersion d'un gaz dans un liquide) et au foisonnement de la solution (augmentation du volume par ajout d'air).

La propriété moussante des protéines est exploitée dans la préparation de nombreux aliments comme la mayonnaise et les mousses utilisées dans les confiseries. Pour la préparation de ces mousses on utilise souvent les protéines du blanc d'œufs, mais d'autres protéines tels que les protéines du lactosérum et les protéines du soja possèdent aussi cette propriété moussante.

# GLOSSAIRE DE BIOCHIMIE

---

**Acétyl-CoA :** Acétyl-coenzyme A. Produit de la glycolyse anaérobie qui, par la suite, est oxydé en gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) dans le cycle de Krebs. Un important intermédiaire du métabolisme des glucides, des lipides et des protéines.

**Acétyl-coenzyme A :** Acétyl-CoA.

**Acide :** Groupe acide carboxylique (-COOH) ou molécule comportant un groupe acide carboxylique, tel le lactate.

**Acide aminé :** Molécule comportant un groupe acide carboxylique (-COOH) et un groupe amine (-NH<sub>2</sub> ou -NH-). Monomères constituant les protéines.

## **Acide aminé essentiel**

Acide aminé qui ne peut être synthétisé par l'organisme et qui doit être obtenu de l'alimentation. Chez l'humain, l'isoleucine, la leucine, la lysine, la méthionine, la phénylalanine, la thréonine, le tryptophane et la valine sont toujours essentiels. L'histidine l'est seulement durant l'enfance et durant une grossesse.

## **Acide aminé glucoformateur**

Acide aminé pouvant être transformé en glucose par la voie de la gluconéogenèse. Tous les acides aminés naturels, sauf la leucine et la lysine, sont glucoformateurs.

**Acide carbonique :** Ion bicarbonate.

**Acide désoxyribonucléique :** ADN.

**Acide gras :** Lipide formé d'une chaîne hydrocarbonée plus ou moins longue comportant un groupe carboxyl (-COOH) à une extrémité et un groupe méthyl (-CH<sub>3</sub>) à l'autre extrémité.

**Acide lactique :** Lactate.

**Acide nicotinique :** Niacine.

**Acide orotique :** Base azotée de la famille des pyrimidines, s'accumulant dans l'organisme lors de certaines pathologies.

**Acide pyruvique :** Pyruvate.

**Acide ribonucléique :** ARN.

**Acide urique :** Base azotée de la famille des purines. C'est le produit final du catabolisme des purines et des acides nucléiques dans l'organisme humain. Une concentration trop élevée d'acide urique dans le sang entraîne la goutte, une maladie caractérisée par la cristallisation et

la formation de concrétions d'urate de sodium dans certaines articulations, sous la peau ou dans les reins.

**Acides nucléiques :** ADN (acide désoxyribonucléique) et ARN (acide ribonucléique).

**Activation :** Augmentation de l'activité d'une enzyme ou de la vitesse d'une voie métabolique.

**Activité optique :** Propriété de certaines molécules en solution de provoquer une rotation du plan de polarisation de la lumière polarisée traversant la solution.

**Adénine :** Base azotée de la famille des purines, entrant, entre autres, dans la structure de l'ATP, de l'ADP, de l'AMP et des acides nucléiques.

**Adénosine :** Nucléoside, de la famille des purines, constitué de l'adénine unie au ribose.

**Adénosine 5'-diphosphate :** ADP .

**Adénosine 5'-monophosphate :** AMP .

**Adénosine 5'-triphosphate ;** ATP.

**ADN :** Acide désoxyribonucléique. Molécule formée de deux polymères de désoxyribonucléosides monophosphates. Ces deux chaînes sont associées et enroulées en double hélice. L'ADN contient les gènes constituant le génome et il se trouve dans les chromosomes et la chromatine. Le 2-désoxyribose est le glucide distinctif de l'ADN. L'adénine, la guanine, la thymine et la cytosine sont les principales bases azotées entrant dans la structure de l'ADN.

**ADP :** deux groupes phosphates unis par une liaison pyrophosphate à haut potentiel énergétique. **Affinité :** Capacité d'une enzyme de former un complexe avec un substrat. Elle est inversement proportionnelle à la valeur de la constante de Michaelis (Km) de l'enzyme envers le substrat.

**Agent oxydant :** Molécule acceptant un ou plusieurs électrons et qui devient ainsi une substance réduite.

**Agent réducteur :** Molécule donnant un ou plusieurs électrons et qui devient ainsi une substance oxydée.

**Albumine :** Principale protéine se trouvant dans le plasma. Elle joue un rôle important dans le maintien de la pression oncotique du sang et elle transporte diverses substances, tels les acides gras, la bilirubine et divers médicaments, dans la circulation sanguine.

**Alcool :** Groupe alcool (-OH) ou molécule comportant un groupe alcool, tel le glycérol.

**Aldéhyde :** Groupe aldéhyde (-CHO) ou molécule comportant un groupe aldéhyde, tel le glycéraldéhyde-3-phosphate.

**Aldohexose :** Hexose comportant un groupe aldéhyde (-CHO).

**Aldolase :** Enzyme, de la famille des lyases, catalysant la scission du fructose-1,6-bisphosphate en glycéraldéhyde- 3-phosphate et dihydroxyacétone phosphate. La réaction est

réversible. L'enzyme se nomme plus exactement : fructose-1,6-bisphosphate aldolase (il existe plusieurs autres aldolases).

**Aldose** : Glucide comportant un groupe aldéhyde (-CHO).

**Allèle** : Chacun des deux gènes occupant le même site (locus) sur deux chromosomes homologues. Un gène allèle est soit dominant, soit récessif.

**Amidon** : Polysaccharide formé de l'association de deux polymères : l'amylose et l'amylopectine. **Amine biogène** : Adénosine-5'-diphosphate. Nucléotide, de la famille des purines, constitué de l'adénine, du ribose et de Molécule synthétisée dans l'organisme et comportant un groupe amine (-NH<sub>2</sub>), telle l'histamine.

**AMP** : Adénosine-5'-monophosphate. Nucléotide, de la famille des purines, constitué de l'adénine, du ribose et d'un groupe phosphate.

**Amylase** : Enzyme salivaire ou pancréatique, de la famille des hydrolases, catalysant principalement l'hydrolyse de l'amidon en glucose.

**Amylopectine** : Polysaccharide. Polymère ramifié de molécules de glucose unies les unes aux autres par des liaisons glycosidiques α-1,4 dans la portion linéaire et par des liaisons α-1,6 aux points de ramification. **Amylose** : Polysaccharide. Polymère ramifié de molécules de glucose unies les unes aux autres par des liaisons glycosidiques α-1,4.

## **Anabolisme**

Phase du métabolisme au cours de laquelle des molécules grosses et complexes sont synthétisées à partir de précurseurs relativement simples. De l'énergie est utilisée au cours de cette phase. L'anabolisme est constitué de plusieurs voies anaboliques.

## **Anémie**

Diminution anormale de la concentration de l'hémoglobine dans le sang. Les causes d'anémie sont multiples. On distingue, entre autres, l'anémie ferriprive et l'anémie hémolytique.

### **Anémie ferriprive**

Anémie attribuable à une carence en fer.

### **Anémie hémolytique**

Anémie attribuable à une destruction excessive des érythrocytes.

## **Anhydrase carbonique**

Enzyme, de la famille des lyases, catalysant l'hydratation du CO<sub>2</sub> pour former l'acide carbonique (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). La réaction est réversible.

**Anion**

Ion ayant une charge négative.

**ARN****ARN de transfert**

ARNt. ARN auquel un acide aminé est lié, ce qui permet son transfert sur les ribosomes, et qui contient une séquence spécifique de bases, l'anticodon, reconnaissant et s'associant à une séquence spécifique de bases, le codon, de l'ARN messager lors de la synthèse protéique.

**ARN messager**

ARNm. ARN qui contient une longue séquence de bases constituant le code servant à la synthèse d'une protéine.

**ARN ribosomique**

ARNr. ARN associé à des protéines et constituant les ribosomes.

**ARNm**

ARN messager.

**ARNr**

ARN ribosomique.

**ARNt**

ARN de transfert.

**ATP**

Adénosine-5'-triphosphate. Nucléotide, de la famille des purines, servant à emmagasiner et à transporter de l'énergie. Il est constitué de l'adénine, du ribose et de trois groupes phosphates unis les uns aux autres par deux liaisons pyrophosphates à haut potentiel énergétique.

**ATPase**

Acide ribonucléique. Polymère de ribonucléosides monophosphates. Le ribose est le glucide distinctif de l'ARN. L'adénine, la guanine, l'uracile et la cytosine sont les principales bases azotées entrant dans la structure de l'ARN. On distingue l'ARN messager, l'ARN de transfert et l'ARN ribosomique.

Na<sup>+</sup>,K<sup>+</sup>-ATPase. Enzyme, de la famille des hydrolases, catalysant l'hydrolyse de l'ATP en ADP et en phosphate inorganique, ce qui libère de l'énergie. Elle joue un rôle important, entre autres, dans le mécanisme d'action de la pompe à sodium.



**Autosome**

Tout chromosome autre que les chromosomes sexuels X et Y. Il y a 22 paires d'autosomes dans les cellules humaines, soit 44 chromosomes non sexuels.

**Autosomique**

Relatif à un autosome.

**Base azotée**

Molécule comportant des atomes d'azote (N) et ayant des propriétés basiques. Il y a deux familles de

bases azotées : les purines et les pyrimidines.

**Besoins énergétiques**

Énergie nécessaire pour le bon fonctionnement des cellules, des tissus, des organes d'une personne.

**Bicarbonate**

Ion bicarbonate.

**Bilan énergétique détaillé**

Dénombrement des ATP produits ou utilisés au cours de chacune des réactions d'une voie métabolique.

**Bilan énergétique global**

Total du nombre d'ATP produits auquel est soustrait le nombre d'ATP utilisés au cours d'une voie métabolique.

**Bile**

Liquide sécrété par le foie, emmagasiné et concentré dans la vésicule biliaire et déversé dans l'intestin lors d'un repas. Elle contient des sels biliaires, du cholestérol, des phospholipides, des pigments biliaires et divers ions. Elle joue un rôle important dans la digestion des lipides et dans l'excrétion des médicaments.

**Bilirubine**

Principal pigment biliaire. Insoluble dans l'eau, elle est véhiculée dans le sang en se liant à l'albumine. Dans le foie, elle est solubilisée par conjugaison à l'acide glucuronique, ce qui la rend soluble dans l'eau et permet son excrétion dans la bile.

## **Biotine**

Vitamine hydrosoluble agissant comme coenzyme de quelques enzymes importantes dans le métabolisme des glucides, des lipides et des acides aminés, telle la pyruvate carboxylase. De nombreux aliments sont de bonnes sources de biotine. Cette vitamine est également synthétisée par les bactéries de la flore intestinale.

## **1,3-bisphosphoglycérate**

Un intermédiaire de la glycolyse et de la gluconéogenèse.

## **2,3-Bisphosphoglycérate**

2,3-Diphosphoglycérate (terme périmé). Molécule formée à partir d'un intermédiaire de la glycolyse anaérobie, se trouvant en grande concentration dans les érythrocytes et qui réduit l'affinité de l'hémoglobine pour l'oxygène.

## **Canalicule**

Petit canal.

## **Caractère**

Trait. Caractéristique biologique héréditaire.

## **Carence**

Absence ou insuffisance d'un ou plusieurs nutriments essentiels pour le métabolisme et le développement de l'organisme.

## **Catabolisme**

Phase du métabolisme au cours de laquelle des molécules relativement grosses et complexes sont dégradées en molécules plus petites et plus simples. De l'énergie est libérée au cours de cette phase. Le catabolisme est constitué de plusieurs voies cataboliques.

## **Catalyseur**

Molécule qui, en petite quantité, accélère la vitesse d'une réaction et qui revient à sa forme initiale à la fin de la réaction. Les enzymes sont des catalyseurs biologiques.

## **Cation**

Ion ayant une charge positive.

## **CDP**

de deux groupes phosphates unis par une liaison pyrophosphate à haut potentiel énergétique.

## **Cellulose**

Polysaccharide formé de nombreuses molécules de glucose unies par des liaisons glycosidiques  $\beta$ -1,4. C'est une fibre alimentaire faisant partie de la structure des végétaux. Elle n'est pas digérée dans le système digestif de l'humain, quoiqu'elle soit dégradée partiellement par les bactéries intestinales.

## **Centre actif**

Site actif.

## **Céphaline**

Phosphatidyléthanolamine.

## **Cétohexose**

Hexose comportant un groupe cétone ( $>C=O$ ).

## **Cétone**

Groupe cétone ( $>C=O$ ) ou molécule comportant un groupe cétone, telle la dihydroxyacétone phosphate.

## **Cétose**

Glucide comportant un groupe cétone ( $>C=O$ ).

## **Chaîne de transfert d'électrons**

Chaîne respiratoire.

## **Chaîne respiratoire**

Chaîne de transfert d'électrons. Ensemble de molécules pouvant capter et donner des électrons, dont des cytochromes et des flavoprotéines, qui agissent en série pour transporter des électrons du NADH ou du FADH<sub>2</sub> jusqu'à l'oxygène qui est ainsi réduit en eau (H<sub>2</sub>O). La respiration cellulaire est principalement attribuable à cette consommation d'oxygène. La chaîne respiratoire est localisée dans la membrane interne des mitochondries.

## **Cholestérol**

Lipide ayant un noyau stéroïde portant un groupe alcool (-OH) auquel un acide gras peut être estérifié (ester de cholestérol). Dans l'organisme humain, le cholestérol est le précurseur des hormones stéroïdes et des acides (sels) biliaires.

## **Choline**

Alcool comportant trois groupes méthyle (-CH<sub>3</sub>) liés à un atome d'azote. Il fait partie de la structure des phosphatidylcholines et de l'acétylcholine, un neurotransmetteur.

**Cytidine 5'-diphosphate.**

Nucléotide, de la famille des pyrimidines, constitué de la cytosine, du ribose et

**Chromatine**

Substance nucléaire pouvant être visualisée à l'aide de colorants durant l'interphase et prenant la forme de chromosomes durant la mitose. Elle est constituée d'ADN et de protéines.

**Chromosome**

Chacun des éléments du noyau cellulaire portant les nombreux gènes constituant le génome. Les chromosomes sont constitués d'ADN et de protéines. Au cours de la division cellulaire, chacun d'eux a une forme de bâtonnet caractéristique. On distingue les autosomes et les chromosomes sexuels.

**Chromosome sexuel**

Gonosome. Chromosomes X et Y déterminant le sexe d'une personne. Les cellules des femmes ont deux chromosomes X, celles des hommes ont un chromosome X et un chromosome Y.

**CMP**

Ribose et d'un groupe phosphate.

**Coenzyme**

Molécule organique essentielle pour que certaines enzymes catalysent une réaction. Plusieurs coenzymes sont dérivées de vitamines. Par exemple, le NADH et le FAD<sup>+</sup> sont des coenzymes. **Complexe**

Association de plusieurs molécules dans des proportions définies.

**Concentration**

Quantité d'une substance en solution dans un volume spécifique.

**Concrétion**

Masse solide étrangère se formant dans un tissu ou un organe, tels les calculs biliaires ou rénaux, et les

thophus d'urate de sodium. **Configuration**

Disposition des atomes d'une molécule dans l'espace.

**Conjugaison**

Liaison d'une molécule insoluble ou peu soluble dans l'eau à une autre molécule, ce qui la rend soluble.

## **CTP**

Cytidine 5'-triphosphate. Nucléotide, de la famille des pyrimidines, servant à emmagasiner et à transporter de l'énergie. Il est constitué de la cytosine, du ribose et de trois groupes phosphates unis les uns aux autres par deux liaisons pyrophosphates à haut potentiel énergétique.

## **Cycle de Krebs**

Voie métabolique participant au métabolisme des glucides, des lipides et des protéines et au cours de laquelle l'acétyl-CoA est oxydé en gaz carbonique (CO<sub>2</sub>), en même temps que du NADH, du FADH<sub>2</sub> et du GTP sont produits. Cette voie catabolique et anabolique génère de l'énergie.

## **Cycle de l'acide citrique**

Cycle de Krebs.

## **Cycle du citrate**

Cycle de Krebs.

## **Cytidine**

Nucléoside, de la famille des pyrimidines, constitué de la cytosine unie au ribose. **Cytidine 5'-diphosphate**

CDP .

## **Cytidine 5'-monophosphate**

CMP .

## **Cytidine 5'-triphosphate**

## **CTP . Cytochrome**

Protéine colorée (chromoprotéine) à laquelle est liée une molécule d'hème, contenant du fer hémique, et

transportant des électrons.

## **Cytoplasme**

Milieu cellulaire à l'exclusion du noyau.

## **Cytosine**

Cytidine 5'-monophosphate. Nucléotide, de la famille des pyrimidines, constitué de la cytosine, du

Base azotée de la famille des pyrimidines, entrant, entre autres, dans la structure du CTP, du CDP, du

CMP et des acides nucléiques.

### **Cytosol**

Fraction liquide du cytoplasme, obtenue après centrifugation et élimination des organites.

### **dAMP**

désoxyribose et d'un groupe phosphate. **dCMP**

Désoxycytidine 5'-monophosphate. Nucléotide, de la famille des pyrimidines, constitué de la cytosine,

du 2-désoxyribose et d'un groupe phosphate. **Décarboxylation**

Réaction au cours de laquelle une molécule de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) est éliminée d'une molécule

organique.

### **Décarboxylation oxydative**

Réaction d'oxydoréduction au cours de laquelle un substrat est oxydé et une molécule de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) est éliminée du substrat.

### **Déficit de la pyruvate kinase**

Érythroenzymopathie autosomique récessive. L'activité de la pyruvate kinase dans les érythrocytes de ces personnes est faible (de 5 à 25 ou 40 % de l'activité normale). Les manifestations de ce déficit enzymatique varient d'une personne à une autre. Chez certaines personnes homozygotes, cette maladie se manifeste par une anémie hémolytique et parfois un ictère. Cela peut résulter d'une modification de l'affinité envers le phosphoénolpyruvate, du pH optimal, de la stabilité thermique et de la sensibilité à des effecteurs allostériques de la pyruvate kinase. Les personnes hétérozygotes n'ont habituellement pas de symptômes cliniques.

### **Déficit enzymatique**

Absence complète ou diminution partielle de l'activité d'une enzyme, attribuable à une mutation du gène codant cette enzyme.

### **Déficiencia de la pyruvate kinase**

Déficit de la pyruvate kinase.

### **Déficiencia enzymática**

Déficit enzymatique.

## **Déphosphorylation**

Hydrolyse d'une liaison unissant un groupe phosphate à une molécule phosphorylée, ce qui libère le groupe phosphate.

## **Déshydratation**

Réaction au cours de laquelle une molécule d'eau (H<sub>2</sub>O) est éliminée d'une molécule organique.

## **Déshydrogénase**

Oxydoréductase.

## **Désoxyadénosine-5'-monophosphate**

dAMP .

## **Désoxycytidine 5'-monophosphate**

dCMP .

## **Désoxyguanosine-5'-monophosphate**

dGMP .

## **Désoxyribonucléoside**

Nucléoside formé par l'union d'une purine ou d'une pyrimidine et du 2-désoxyribose.

## **Désoxyribonucléoside monophosphate**

Désoxyadénosine-5'-monophosphate. Nucléotide, de la famille des purines, constitué de l'adénine, du 2-

Nucléoside monophosphate formé par l'union d'une purine ou d'une pyrimidine, du 2-désoxyribose et d'un groupe phosphate. Les principaux sont le dAMP et le dGMP (nucléotides puriques), le dCMP et le dTMP (nucléotides pyrimidiques). Ce sont les monomères constituant l'ADN.

## **Désoxyribonucléotide**

Nucléotide formé par l'union d'une purine ou d'une pyrimidine et du 2-désoxyribose (ce qui constitue un

désoxyribonucléoside), auquel sont liés un, deux ou trois groupes phosphates.

## **2-Désoxyribose**

Monosaccharide (ose) de la famille des pentoses.

**Désoxythymidine-5'-monophosphate**

dTMP .

**Désoxythymidine-5'-triphosphate**

dTTP .

**Dextrogyre**

Propriété d'une molécule de faire dévier le plan de polarisation de la lumière polarisée vers la droite.

**dGMP**

Désoxyguanosine-5'-monophosphate. Nucléotide, de la famille des purines, constitué de la guanine, du

2-désoxyribose et d'un groupe phosphate.

**Diffusion facilitée**

Transport par diffusion facilitée.

**Diffusion simple**

Transport par diffusion simple.

**Diholoside**

Disaccharide.

**Dihydroxyacétone phosphate**

Glycérone phosphate. Un intermédiaire de la glycolyse et de la gluconéogenèse. Triose de la famille des cétooses, isomère de fonction du glycéraldéhyde-3-phosphate.

**Dioxyde de carbone**

Gaz carbonique. CO<sub>2</sub>.

**2,3-Diphosphoglycérate**

Terme périmé. Voir 2,3-Bisphosphoglycérate.

**Disaccharide**

Diholoside. Glucide constitué de deux monosaccharides unis par une liaison glycosidique. Les principaux disaccharides alimentaires sont le saccharose, le lactose et le maltose qui est généré au cours de la digestion de l'amidon.



## **Dominant**

Gène dominant.

## **dTMP**

Désoxythymidine 5'-monophosphate. Nucléotide, de la famille des pyrimidines, constitué de la thymine, du 2-désoxyribose et d'un groupe phosphate.

## **dTTP**

Désoxythymidine 5'-triphosphate. Nucléotide, de la famille des pyrimidines, servant à emmagasiner et à transporter de l'énergie. Il est constitué de la thymine, du 2-désoxyribose et de trois groupes phosphates unis les uns aux autres par deux liaisons pyrophosphates à haut potentiel énergétique.

## **dAMP**

Désoxyadénosine-5'-monophosphate. Nucléotide, de la famille des purines, constitué de l'adénine, du 2-désoxyribose et d'un groupe phosphate.

## **dCMP**

Désoxycytidine 5'-monophosphate. Nucléotide, de la famille des pyrimidines, constitué de la cytosine, du 2-désoxyribose et d'un groupe phosphate.

## **Décarboxylation**

Réaction au cours de laquelle une molécule de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) est éliminée d'une molécule organique.

## **Décarboxylation oxydative**

Réaction d'oxydoréduction au cours de laquelle un substrat est oxydé et une molécule de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) est éliminée du substrat.

## **Déficit de la pyruvate kinase**

Érythroenzymopathie autosomique récessive. L'activité de la pyruvate kinase dans les érythrocytes de ces personnes est faible (de 5 à 25 ou 40 % de l'activité normale). Les manifestations de ce déficit enzymatique varient d'une personne à une autre. Chez certaines personnes homozygotes, cette maladie se manifeste par une anémie hémolytique et parfois un ictère. Cela peut résulter d'une modification de l'affinité envers le phosphoénolpyruvate, du pH optimal, de la stabilité thermique et de la sensibilité à des effecteurs allostériques de la pyruvate kinase. Les personnes hétérozygotes n'ont habituellement pas de symptômes cliniques.

### **Déficit enzymatique**

Absence complète ou diminution partielle de l'activité d'une enzyme, attribuable à une mutation du gène codant cette enzyme.

### **Déficiencia de la piruvate kinase**

Déficit de la pyruvate kinase.

### **Déficiencia enzymatique**

Déficit enzymatique. `

### **Déphosphorylation**

Hydrolyse d'une liaison unissant un groupe phosphate à une molécule phosphorylée, ce qui libère le groupe phosphate.

### **Déshydratation**

Réaction au cours de laquelle une molécule d'eau (H<sub>2</sub>O) est éliminée d'une molécule organique. **Déshydrogénase**

Oxydoréductase.

### **Désoxyadénosine-5'-monophosphate**

dAMP .

### **Désoxycytidine 5'-monophosphate**

dCMP .

### **Désoxyguanosine-5'-monophosphate**

dGMP .

### **Désoxyribonucléoside**

Nucléoside formé par l'union d'une purine ou d'une pyrimidine et du 2-désoxyribose.

### **Désoxyribonucléoside monophosphate**

Nucléoside monophosphate formé par l'union d'une purine ou d'une pyrimidine, du 2-désoxyribose et d'un groupe phosphate. Les principaux sont le dAMP et le dGMP (nucléotides puriques), le dCMP et le dTMP (nucléotides pyrimidiques). Ce sont les monomères constituant l'ADN.

**Désoxyribonucléotide**

Nucléotide formé par l'union d'une purine ou d'une pyrimidine et du 2-désoxyribose (ce qui constitue un désoxyribonucléoside), auquel sont liés un, deux ou trois groupes phosphates.

**2-Désoxyribose**

Monosaccharide (ose) de la famille des pentoses.

**Désoxythymidine-5'-monophosphate**

dTMP .

**Désoxythymidine-5'-triphosphate**

dTTP .

**Dextrogyre**

Propriété d'une molécule de faire dévier le plan de polarisation de la lumière polarisée vers la droite.

**dGMP**

Désoxyguanosine-5'-monophosphate. Nucléotide, de la famille des purines, constitué de la guanine, du 2-désoxyribose et d'un groupe phosphate.

**Diffusion facilitée**

Transport par diffusion facilitée.

**Diffusion simple**

Transport par diffusion simple.

**Diholoside**

Disaccharide.

**Dihydroxyacétone phosphate**

Glycérone phosphate. Un intermédiaire de la glycolyse et de la gluconéogenèse. Triose de la famille des cétooses, isomère de fonction du glycéraldéhyde-3-phosphate.

**Dioxyde de carbone**

Gaz carbonique. CO<sub>2</sub>.

**2,3-Diphosphoglycérate**

Terme périmé. Voir 2,3-Bisphosphoglycérate.

**Disaccharide**

Diholoside. Glucide constitué de deux monosaccharides unis par une liaison glycosidique. Les principaux disaccharides alimentaires sont le saccharose, le lactose et le maltose qui est généré au cours de la digestion de l'amidon.

**Dominant**

Gène dominant. `

**dTMP**

Désoxythymidine 5'-monophosphate. Nucléotide, de la famille des pyrimidines, constitué de la thymine, du 2-désoxyribose et d'un groupe phosphate.

**dTTP**

Désoxythymidine 5'-triphosphate. Nucléotide, de la famille des pyrimidines, servant à emmagasiner et à transporter de l'énergie. Il est constitué de la thymine, du 2-désoxyribose et de trois groupes phosphates unis les uns aux autres par deux liaisons pyrophosphates à haut potentiel énergétique.

**Effecteur allostérique**

Molécule se fixant à un site allostérique d'une enzyme allostérique, ce qui entraîne un changement de configuration ayant pour conséquence soit une augmentation (effecteur positif), soit une diminution (effecteur négatif) de l'activité enzymatique. C'est habituellement un intermédiaire d'une voie métabolique.

**Éléments figurés**

Cellules du sang. On distingue les érythrocytes, les leucocytes et les plaquettes.

**Énergie**

Capacité d'effectuer un travail.

**Énolase**

Enzyme, de la famille des lyases, catalysant la déshydratation du 2-phosphoglycérate en phosphoénolpyruvate. Métalloenzyme nécessitant du magnésium. La réaction est réversible.

**Enzyme**

Protéine catalysant une réaction biochimique. Il y a six classes d'enzymes : les oxydoréductases, les transférases, les hydrolases, les lyases, les isomérases et les ligases.

**Enzyme allostérique**

Enzyme ayant une courbe de cinétique sigmoïde et dont l'activité peut être modifiée par un effecteur allostérique. En se liant à un site autre que le site actif, l'effecteur induit un changement de configuration de l'enzyme.

**Enzyme clé**

Enzyme dont l'activité est régulée et qui peut, dans certains cas, limiter la vitesse de l'ensemble d'une voie métabolique.

**Enzyme limitante**

Enzyme clé dont l'activité détermine la vitesse de l'ensemble d'une voie métabolique.

**Enzymopathie**

Maladie héréditaire attribuable à un déficit enzymatique.

**Équilibre**

État où la vitesse de transformation du substrat en produit, lors d'une réaction réversible, est égale à la vitesse de transformation du produit en substrat. Donc, la vitesse apparente d'une réaction réversible à l'équilibre est nulle.

**Érythrocyte**

Globule rouge, hématie. Cellule discoïde biconcave dépourvue de noyau, de mitochondries, et de ribosomes, et contenant une grande quantité d'hémoglobine lui donnant sa coloration. Les érythrocytes transportent l'oxygène (O<sub>2</sub>) des poumons à toutes les cellules de l'organisme et une partie du gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) des cellules aux poumons. Le glucose est la seule source d'énergie des érythrocytes.

**Érythroenzymopathie**

Maladie héréditaire attribuable à un déficit enzymatique dans les érythrocytes.

**Ester**

Molécule résultant de l'estérification d'un acide et d'un alcool.

**Estérification**

Réaction au cours de laquelle un groupe alcool (-OH) est condensé à un groupe acide carboxylique (-

COOH) avec élimination d'une molécule d'eau (H<sub>2</sub>O), ce qui forme une liaison ester (-COOC-).

## **Éthanolamine**

Alcool comportant un groupe amine ( $-\text{NH}_2$ ). Il fait partie de la structure des phosphatidyléthanolamines. C'est un précurseur de la choline.

## **FAD**

## **FADH<sub>2</sub>**

FAD.

## **Fer**

Ion métallique formant un complexe avec une molécule d'hème (fer hémique) ou avec une protéine (fer non hémique). Le foie, le coeur, les rognons, les fruits de mer et le poulet sont de bonnes sources de fer. Le fer sert à la respiration cellulaire et au transport de l'oxygène et du gaz carbonique dans le sang. On distingue deux formes ionisées :  $\text{Fe}^{2+}$  (fer ferreux) et  $\text{Fe}^{3+}$  (fer ferrique).

## **Fer hémique**

Fer formant un complexe avec une molécule d'hème. On le distingue du fer non hémique.

## **Fer non hémique**

Fer formant un complexe avec une protéine. On le distingue du fer hémique.

## **Flavine adénine dinucléotide**

Flavine adénine dinucléotide. Coenzyme dérivée de la riboflavine, nécessaire à plusieurs réactions d'oxydoréduction catalysées par des flavoprotéines. La forme oxydée,  $\text{FAD}^+$ , accepte des électrons et des protons ( $\text{H}^+$ ); la forme réduite,  $\text{FADH}_2$ , donne des électrons et des protons.

FAD.

## **Flavine mononucléotide**

FMN.

## **Flavoprotéine**

Protéine contenant une coenzyme dérivée de la riboflavine, soit le FAD ou le FMN.

## **FMN**

Flavine mononucléotide. Coenzyme dérivée de la riboflavine, nécessaire à plusieurs réactions d'oxydoréduction catalysées par des flavoprotéines. La forme oxydée,  $\text{FMN}^+$ , accepte des électrons et des protons ( $\text{H}^+$ ); la forme réduite,  $\text{FMNH}_2$ , donne des électrons et des protons.

## **FMNH2**

FMN.

## **Fructose**

Monosaccharide (ose) de la famille des cétohexoses. Il est abondant dans les fruits et le miel. C'est un

des deux monosaccharides constituant le saccharose.

## **Fructose-1,6-bisphosphate**

Un intermédiaire de la glycolyse et de la gluconéogenèse. Hexose de la famille des cétohexoses (cétohexoses), produit lors de la phosphorylation du fructose-6-phosphate par la phosphofructokinase. Isomère de position du fructose-2,6-bisphosphate.

## **Fructose-2,6-bisphosphate**

Hexose de la famille des cétohexoses (cétohexoses). Isomère de position du fructose-1,6-bisphosphate

## **Fructose-6-phosphate**

Un intermédiaire de la glycolyse et de la gluconéogenèse. Hexose de la famille des cétohexoses (cétohexoses), isomère de fonction du glucose-6-phosphate.

## **Galactose**

Monosaccharide (ose) de la famille des aldohexoses. C'est un des deux monosaccharides constituant le lactose.

## **Gaz carbonique (CO2)**

Dioxyde de carbone. Il est produit dans l'organisme au cours du métabolisme, principalement lors des décarboxylations. Par la suite, il est transporté dans le sang sous forme de gaz dissous, d'ion bicarbonate ou lié à l'hémoglobine se trouvant dans les érythrocytes. Il est expiré par les poumons.

## **GDP**

Deux groupes phosphates unis par une liaison pyrophosphate à haut potentiel énergétique.

## **Gène**

Segment d'ADN servant à la synthèse d'un ARN ribosomique, d'un ARN de transfert ou, le plus souvent, d'un ARN messager codant une ou plusieurs protéines.

### **Gène dominant**

Gène allèle qui masque l'effet de l'autre allèle s'il est récessif. Son effet se manifeste toujours, que la personne soit homozygote ou hétérozygote pour ce gène.

### **Gène récessif**

Gène allèle dont l'effet sur un caractère héréditaire est masqué par l'autre allèle s'il est dominant. L'effet d'un gène récessif ne se manifeste que chez une personne homozygote pour ce gène. **Génome**

Ensemble du matériel génétique d'une personne. Il est constitué des gènes se trouvant dans les 46 chromosomes, soit 22 paires d'autosomes et une paire de chromosomes sexuels. Un chromosome de chaque paire (23) provient de l'ovule maternel et l'autre chromosome de chaque paire provient du spermatozoïde paternel. L'ADN se trouvant dans les mitochondries porte également quelques gènes constituant le génome mitochondrial. Guanosine-5'-diphosphate. Nucléotide, de la famille des purines, constitué de la guanine, du ribose et de

### **Globule blanc**

Leucocyte.

### **Globule rouge**

Érythrocyte.

### **Glucides**

Famille de molécules dont la formule chimique brute est, dans la plupart des cas,  $C_n(H_2O)_n$ , ce qui explique qu'ils sont également nommés hydrates de carbone. Les principaux glucides alimentaires sont des polysaccharides, des disaccharides et des monosaccharides.

### **Gluconéogenèse**

Voie métabolique au cours de laquelle du glucose est synthétisé à partir de lactate, d'acides aminés glucoformateurs ou de glycérol. Cette voie anabolique nécessite de l'énergie.

### **Glucose**

Monosaccharide (ose) de la famille des aldohexoses. C'est un constituant de disaccharides et de polysaccharides. Il existe deux isomères stériques du glucose. Dans l'organisme, c'est le D-glucose qui est métabolisé ou produit.

### **Glucose-6-phosphate**

Un intermédiaire de la glycolyse, de la gluconéogenèse et du métabolisme du glycogène. Hexose de la famille des aldoses (aldohexoses), produit lors de la phosphorylation du glucose par l'hexokinase.



### **Glucose-6-phosphate isomérase**

Enzyme, de la famille des isomérases, catalysant la transformation du glucose-6-phosphate, un aldose, en fructose-6-phosphate, un cétose. La réaction est réversible.

### **GLUT-1**

Transporteur spécifique du glucose, localisé dans la membrane des érythrocytes.

### **Glycémie**

Concentration du glucose dans le sang.

### **Glycéraldéhyde-3-phosphate**

Un intermédiaire de la glycolyse et de la gluconéogenèse. Triose de la famille des aldoses, isomère de fonction de la dihydroxyacétone phosphate.

### **Glycéraldéhyde-3-phosphate déshydrogénase**

Enzyme, de la famille des oxydoréductases, catalysant l'oxydation du glycéraldéhyde-3-phosphate en 1,3-bisphosphoglycérate, avec incorporation de phosphate inorganique, et la réduction du NAD<sup>+</sup> en NADH. La réaction est réversible.

### **Glycérol**

Substrat de la gluconéogenèse. Alcool entrant dans la structure des triacylglycérols et des phospholipides.

### **Glycérone phosphate**

Dihydroxyacétone phosphate.

### **Glycogène**

Polysaccharide ramifié, ressemblant à l'amylopectine, constitué de nombreuses molécules de glucose unies par des liaisons glycosidiques  $\alpha$ -1,4 dans la portion linéaire et par des liaisons  $\alpha$ -1,6 aux points de ramification. Il est surtout emmagasiné dans le foie et les muscles squelettiques.

### **Glycolipide**

Lipide contenant un ou plusieurs glucides.

### **Glycolyse**

Voie métabolique au cours de laquelle le glucose est transformé en pyruvate, puis en

### **Hématie**

Érythrocyte.

**Hème**

Pigment contenant du fer entrant dans la structure de l'hémoglobine, de la myoglobine et des cytochromes.

**Hémizygote**

État d'une personne de sexe masculin, lorsqu'on réfère à un gène localisé sur le chromosome sexuel X.

**Hémoglobine**

Molécule constituée de quatre chaînes de globine, une protéine, et de quatre molécules d'hème. Elle est présente en grande concentration dans les érythrocytes. Elle sert au transport de l'oxygène et du gaz carbonique dans le sang.

**Hémolyse**

Rupture ou destruction des érythrocytes. L'hémolyse physiologique est la destruction normale des vieux érythrocytes dans la moelle osseuse. L'hémolyse pathologique est une destruction anormale et précoce des érythrocytes dans les vaisseaux sanguins, la rate ou le foie au cours de certaines maladies. Elle peut entraîner une anémie.

**Héréditaire**

Un gène ou un caractère se transmettant d'un parent à un descendant.

**Hétérozygote**

Personne dont les deux allèles d'un gène sont différents.

**Hexokinase**

Enzyme allostérique, de la famille des transférases, catalysant le transfert d'un groupe phosphoryle (phosphorylation) de l'ATP au glucose et produisant du glucose-6-phosphate et de l'ADP. Elle peut également phosphoryler le fructose et le mannose. Dans les érythrocytes, cette enzyme clé de la glycolyse est inhibée par une concentration élevée de glucose-6-phosphate. La réaction est irréversible et elle nécessite du magnésium qui forme un complexe avec l'ATP et l'ADP.

**Hexose**

Monosaccharide (ose) à 6 atomes de carbone.

**Histamine**

Amine biogène agissant comme un médiateur chimique ou un neurotransmetteur. Il est formé à partir de l'histidine.

**Histidine**

Acide aminé glucoformateur, non essentiel, sauf durant l'enfance et la grossesse. Précurseur utilisé pour

la synthèse de l'histamine.

**Homozygote**

Personne dont les deux allèles d'un gène sont identiques.

**Hormone**

Molécule sécrétée dans le sang par une glande et entraînant des effets dans divers organes ou tissus possédant des récepteurs spécifiques de cette molécule.

**Hydratation**

Addition d'une molécule d'eau ( $H_2O$ ) à une molécule organique.

**Hydrate de carbone**

Glucide.

**Hydrolase**

Enzyme catalysant la rupture d'une liaison chimique par addition d'eau ( $H_2O$ ). La lactase et l'amylase, deux enzymes digestives, et l'ATPase sont des hydrolases.

**Hydrolyse**

Réaction au cours de laquelle une liaison est brisée par addition d'une molécule d'eau ( $H_2O$ ).

**Hypoxanthine**

Base azotée de la famille des purines.

**Ictère**

Quantité anormalement élevée de pigments biliaires dans le sang entraînant une coloration jaune

anormale de la peau et des muqueuses : la jaunisse. Il est souvent attribuable à une maladie hépatique.

**Ictère hémolytique**

Ictère attribuable à une destruction (hémolyse) excessive des érythrocytes.

**Inhibition**

Diminution de l'activité d'une enzyme ou de la vitesse d'une voie métabolique.

**Inosine**

Nucléoside, de la famille des purines, constitué de l'hypoxanthine unie au ribose.

**Intermédiaire**

Produit d'une réaction qui est un substrat d'une autre réaction. L'intermédiaire fait en sorte que ces deux réactions sont couplées.

**Interphase**

Période entre deux divisions cellulaires.

**Ion bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ )**

Forme ionisée de l'acide carbonique ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) résultant de l'hydratation du gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ) par l'anhydrase carbonique. Anion constituant la réserve alcaline du sang.

**Irréversible**

Réaction irréversible.

**Isoenzymes**

Les diverses formes moléculaires d'une même enzyme. Elles catalysent la même réaction biochimique, mais chacune possède des propriétés physiques, chimiques et cinétiques particulières. La nature ou la proportion des isoenzymes d'une même enzyme varie d'un tissu à un autre. Par exemple, il existe cinq isoenzymes de la lactate déshydrogénase.

**Isomérase**

Enzyme catalysant un réarrangement intramoléculaire entraînant la transformation d'isomères, principalement des isomères de fonction, telle la glucose-6-phosphate isomérase, ou des isomères de position, telle la phosphoglycérate mutase.

**Isomères**

Molécules ayant la même formule structurale brute mais des structures moléculaires développées différentes. Il existe différents types d'isomères : isomères de fonction, isomères de position, isomères stériques et isomères optiques.

**Isomères de fonction**

Molécules différant par un groupe fonctionnel. Par exemple, le glucose est un aldose et le fructose est un cétose.

**Isomères de position**

Molécules différant par la position d'un atome ou d'un groupe, tels le 2-phosphoglycérate et le 3-

phosphoglycérate. **Isomères optiques**

Molécules différant par leur activité optique. Par exemple, le L-lactate est dextrogyre et le D-lactate est

lévogyre. **Isomères stériques**

Stéréoisomères. Molécules différant par leur configuration, tel le glucose et le galactose, deux hexoses,

ou le D-lactate et le L-lactate, des isomères optiques. **Isozymes**

Isoenzymes.

Il n'y a aucune définition dans cette section.

### **Kinase**

### **Lactase**

Enzyme intestinale, de la famille des hydrolases, catalysant l'hydrolyse du lactose en glucose et en galactose.

### **Lactate**

Forme ionisée de l'acide lactique. Produit final de la glycolyse anaérobie. Le lactate dans le sang est capté par divers organes ou cellules de l'organisme humain. Dans le foie, il sert à synthétiser du glucose et dans le coeur, il est oxydé en gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) en même temps que de l'énergie est libérée. Il existe deux isomères optiques du lactate. Dans l'organisme, c'est le L-lactate qui est produit et métabolisé.

### **Lactate déshydrogénase**

Enzyme, de la famille des oxydoréductases, catalysant la réduction du pyruvate en lactate et l'oxydation du NADH en NAD<sup>+</sup>. La réaction est réversible. L'enzyme est constituée de quatre sous-unités de deux types : les sous-unités H (heart / coeur) et M (muscles). Il existe cinq isoenzymes de la lactate déshydrogénase : MMMM (M<sub>4</sub>), MMMH (M<sub>3</sub>H), MMHH (M<sub>2</sub>H<sub>2</sub>), MHHH (MH<sub>3</sub>) et HHHH (H<sub>4</sub>).

### **Lactose**

Disaccharide constitué d'une molécule de galactose unie à une molécule de glucose par une liaison glycosidique. Glucide se trouvant dans le lait.

### **Lécithine**

Phosphatidylcholine.

**Leucocyte**

Globule blanc. Cellule du sang jouant un rôle essentiel dans le système immunitaire, donc dans la lutte contre les infections et les cancers.

**Lévogyre**

Propriété d'une molécule de faire dévier le plan de polarisation de la lumière polarisée vers la gauche.

**Liaison ester (-COOC-)**

Liaison entre un groupe alcool (-OH) et un groupe acide carboxylique (-COOH), formée par élimination d'une molécule d'eau (H<sub>2</sub>O).

**Liaison glycosidique (-C-O-C-)**

Liaison entre deux groupes hydroxyle (-OH) de deux monosaccharides, formée par élimination d'une molécule d'eau (H<sub>2</sub>O).

**Liaison peptidique (-CONH-)**

Liaison entre le groupe amine (-NH<sub>2</sub>) d'un acide aminé et le groupe acide carboxylique (-COOH) d'un autre acide aminé. Elle est formée par élimination d'une molécule d'eau (H<sub>2</sub>O).

**Liaison pyrophosphate (-P-O-P-)**

Liaison phosphoanhydride. Liaison à haut potentiel énergétique entre deux groupes phosphates.

**Ligand**

Molécule pouvant se lier de façon non covalente à un récepteur ou à un site spécifique sur une protéine.

**Ligase**

Enzyme, de la famille des transférases, catalysant le transfert d'un groupe phosphoryle d'un substrat à un autre. Très souvent, un des substrats est l'ADP, un accepteur de groupe phosphoryle ou l'ATP, un donneur de groupe phosphoryle. Enzyme catalysant l'union de deux molécules tout en hydrolysant une liaison pyrophosphate à haut potentiel énergétique. La pyruvate carboxylase est une ligase.

**Lipides**

Famille hétérogène de molécules organiques insolubles dans l'eau et autres solvants polaires, mais solubles dans des solvants non polaires, tels le chloroforme ou l'éther. Les principaux lipides sont : les triacylglycérols, les phospholipides, les acides gras et le cholestérol.

## **Lumière polarisée**

Polarisation.

## **Lyase**

Enzyme catalysant la rupture d'une liaison chimique par un autre moyen que l'hydrolyse ou l'oxydation. L'aldolase est une lyase.

## **Magnésium (Mg<sup>2+</sup>)**

Ion métallique présent dans toutes les cellules, essentiel dans de nombreuses réactions biochimiques. Il est particulièrement abondant dans les os. Les céréales, les noix, les légumineuses et les légumes verts sont de bonnes sources de magnésium.

## **Maladie héréditaire**

Maladie résultant d'une mutation d'un gène.

## **Maltose**

Disaccharide constitué de deux molécules de glucose unies par une liaison glycosidique. Glucide formé principalement au cours de la digestion de l'amidon.

## **Manganèse (Mn<sup>2+</sup>)**

Ion métallique requis par certaines métalloenzymes, telle la pyruvate carboxylase. Les céréales, les noix, les fruits et les légumes verts sont des sources de manganèse.

## **Mannose**

Monosaccharide (ose) de la famille des aldohexoses.

## **Médiateur chimique**

Molécule produite par une cellule et agissant sur une autre cellule possédant un récepteur spécifique de ce médiateur.

## **Membrane plasmique**

Membrane cellulaire externe. Elle est composée d'une double couche de lipides (principalement des phospholipides, mais également du cholestérol et des glycolipides) dans laquelle sont insérées diverses protéines (tels des récepteurs, des transporteurs et des enzymes). La perméabilité de la membrane plasmique est sélective : les molécules liposolubles et les gaz la traversent facilement, tandis que seulement certaines molécules hydrosolubles la traversent grâce à des transporteurs spécifiques de chacune d'elles.

## **Métabolisme**

Ensemble des réactions couplées se produisant dans les cellules de l'organisme. Il permet soit d'extraire l'énergie des nutriments (catabolisme), soit de synthétiser les constituants nécessaires à la structure et au bon fonctionnement des cellules (anabolisme).

### **Métalloenzyme**

Enzyme ayant un ou plusieurs ions métalliques associés à leur structure protéique et essentiels à leur activité catalytique ou au maintien de leur structure tridimensionnelle.

### **Mitochondrie**

Organite délimité par deux membranes. Les mitochondries sont localisées dans le cytoplasme des cellules et elles jouent un rôle important dans le métabolisme énergétique cellulaire, puisqu'elles sont le site de synthèse de la majorité de l'ATP et aussi de la respiration cellulaire. Elles contiennent plusieurs enzymes catalysant des réactions d'oxydoréduction, la chaîne respiratoire et le mécanisme de la phosphorylation oxydative.

### **Mitose**

Processus de division cellulaire au cours duquel les chromosomes d'une cellule sont dupliqués et

répartis de façon identique dans les deux cellules formées.

### **Molécule**

Ensemble d'atomes unis les uns aux autres par des liaisons chimiques.

### **Molécule phosphorylée**

Molécule à laquelle un ou plusieurs groupes phosphates est lié, à la suite du transfert d'un ou plusieurs groupes phosphoryles par une kinase.

### **Monomère**

Molécule libérée lors de l'hydrolyse d'un polymère, tels le glucose et les acides aminés. Également, autre terme désignant une sous-unité.

### **Monosaccharide**

Ose. Glucide le plus simple, non hydrolysable. Les monosaccharides sont de deux types : les aldoses et les cétooses. On les distingue également selon le nombre d'atomes de carbone dans leur structure chimique, tels les trioses, les pentoses et les hexoses. Les principaux monosaccharides sont le glucose, le fructose et le mannose. Ils ont tous la même formule chimique ( $C_n(H_2O)_n$ ), mais des configurations différentes.

### **Mutation**

Modification transmissible, spontanée ou provoquée, d'un gène.



## **Myoglobine**

Protéine musculaire à laquelle est associée une molécule d'hème. Elle sert au transport de l'oxygène et à sa mise en réserve dans les muscles.

## **NADP**

Nicotinamide adénine dinucléotide phosphate. Coenzyme dérivée de la niacine, nécessaire à plusieurs réactions d'oxydoréduction. La forme oxydée, NADP<sup>+</sup>, accepte des électrons et des protons (H<sup>+</sup>); la forme réduite, NADPH, reçoit des électrons et des protons.

## **NADPH**

NADP .

,

## **Na<sup>+</sup>,K<sup>+</sup>-ATPase**

ATPase.

## **Neurotransmetteur**

Molécule libérée par un neurone lors d'une stimulation et se fixant à un récepteur sur un autre neurone, ce qui entraîne la transmission de l'influx nerveux, ou à un récepteur sur une cellule cible, ce qui entraîne divers effets dans un organe.

## **Niacine**

Acide nicotinique, vitamine B3, vitamine PP, vitamine antipellagreuse. Vitamine hydrosoluble faisant partie de la structure du NAD et du NADP, des coenzymes nécessaires à de nombreuses réactions d'oxydoréduction. Les aliments riches en protéines (viande, volaille, poisson, levure, arachides) sont de bonnes sources de niacine. Cette vitamine est également synthétisée en quantité insuffisante à partir du tryptophane dans l'organisme humain. Une carence en niacine entraîne le pellagre.

## **Nicotinamide adénine dinucléotide**

Nicotinamide adénine dinucléotide. Coenzyme dérivée de la niacine, nécessaire à de nombreuses réactions d'oxydoréduction. La forme oxydée, NAD<sup>+</sup>, accepte des électrons et des protons (H<sup>+</sup>); la forme réduite, NADH, donne des électrons et des protons.

NAD.

## **Nicotinamide adénine dinucléotide phosphate**

NADP .

## **Noyau**

Organite cellulaire délimité par l'enveloppe nucléaire constituée de deux membranes contenant des pores. Il contient le nucléole et la chromatine dans laquelle se trouve l'ADN et la plupart des gènes.

## **Nucléole**

Organite nucléaire dans lequel est synthétisés l'ARN ribosomique.

## **Nucléoside**

Molécule formée par l'union d'une purine ou d'une pyrimidine et d'un glucide. Il en existe deux types selon le glucide : les ribonucléosides et les désoxyribonucléosides. Les principaux sont l'adénosine, l'inosine et la guanosine (nucléosides puriques), la cytidine, la thymidine et l'uridine (nucléosides pyrimidiques).

## **Nucléoside diphosphate**

Molécule formée par l'union d'une purine ou d'une pyrimidine et d'un glucide (ce qui constitue un nucléoside) à laquelle sont liés deux groupes phosphates unis l'un à l'autre par une liaison pyrophosphate. Les principaux sont l'ADP et le GDP (nucléotides puriques), le CDP et l'UDP (nucléotides pyrimidiques).

## **Nucléoside monophosphate**

Molécule formée par l'union d'une purine ou d'une pyrimidine et d'un glucide (ce qui constitue un nucléoside) à laquelle est lié un groupe phosphate. Les principaux sont l'AMP et le GMP (nucléotides puriques), le CMP, l'UMP et le dTMP (nucléotides pyrimidiques). Ce sont les monomères constituant les acides nucléiques.

## **Nucléoside triphosphate**

Molécule formée par l'union d'une purine ou d'une pyrimidine et d'un glucide (ce qui constitue un nucléoside) à laquelle sont liés trois groupes phosphates unis les uns aux autres par deux liaisons pyrophosphates. Les principaux sont l'ATP et le GTP (nucléotides puriques), le CTP, l'UTP et le dTTP (nucléotides pyrimidiques).

## **Nucléotide**

Molécule formée par l'union d'une purine ou d'une pyrimidine et d'un glucide (ce qui constitue un nucléoside) à laquelle sont liés un, deux ou trois groupes phosphates. Il en existe deux types selon le glucide: les ribonucléotides et les désoxyribonucléotides. On distingue également les nucléosides monophosphates, les nucléosides diphosphates et les nucléosides triphosphates.

**Nutriment**

Molécule d'origine alimentaire pouvant être absorbée telle quelle dans l'organisme, tels le glucose ou les vitamines. Les nutriments sont souvent les produits de la digestion des aliments. **Nutriment essentiel**

Nutriment d'origine alimentaire qui ne peut être synthétisé en quantité suffisante dans l'organisme, mais qui est essentiel à la croissance et à la survie de l'organisme.

**Organite**

Structure intracellulaire différenciée ayant une fonction particulière, tels le noyau et les mitochondries.

**Orotate**

Forme ionisée de l'acide orotique.

**Orthophosphate**

Phosphate inorganique.

**Ose**

Monosaccharide.

**Oxaloacétate**

Un important intermédiaire du métabolisme des glucides et des acides aminés.

**Oxydation**

Perte d'un ou plusieurs électrons par une molécule, parfois accompagnée d'une perte de protons ( $H^+$ ).

**Oxydoréductase**

Enzyme catalysant une réaction d'oxydoréduction. Cette famille d'enzymes est constituée de nombreuses déshydrogénases nécessitant une coenzyme, tels le NAD, le NADP, le FAD ou le FMN. Par exemple, la glycéraldéhyde-3-phosphate déshydrogénase et la lactate déshydrogénase nécessitent le NAD.

**Oxydoréduction**

Réaction au cours de laquelle une molécule est oxydée (c'est un agent réducteur) et une autre est réduite (c'est un agent oxydant).

## **Oxygène (O<sub>2</sub>)**

Gaz essentiel au métabolisme et à la survie de l'organisme. Il est transporté des poumons aux tissus par l'hémoglobine se trouvant dans les érythrocytes. Il se lie à la myoglobine dans les muscles.

## **Pellagre**

Maladie résultant d'une carence en niacine. Elle se caractérise par des troubles cutanés, intestinaux, neurologiques et psychiatriques.

## **Pentose**

Monosaccharide (ose) à 5 atomes de carbone.

## **pH optimal**

pH du milieu dans lequel une enzyme est la plus active.

## **Phosphate inorganique (HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)**

Orthophosphate. Forme ionisée de l'acide phosphorique (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>). Symbole : Pi.

## **Phosphatidylcholine**

Lécithine. Phospholipide constitué d'une molécule de glycérol, de deux acides gras, d'un groupe phosphate et de la choline. Il existe plusieurs phosphatidylcholines différant par leurs acides gras.

## **Phosphatidyléthanolamine**

Céphaline. Phospholipide constitué d'une molécule de glycérol, de deux acides gras, d'un groupe phosphate et de l'éthanolamine. Il existe plusieurs phosphatidyléthanolamines différant par leurs acides gras.

## **Phosphatidylsérine**

Phospholipide constitué d'une molécule de glycérol, de deux acides gras, d'un groupe phosphate et de la sérine. Il existe plusieurs phosphatidylcholines différant par leurs acides gras. **Phosphoénolpyruvate**

Un intermédiaire de la glycolyse et de la gluconéogenèse.

## **Phosphofructokinase**

Enzyme, de la famille des transférases, catalysant le transfert d'un groupe phosphoryle (phosphorylation) de l'ATP au fructose-6-phosphate et produisant du fructose-1,6-bisphosphate et de l'ADP. Cette kinase a une spécificité absolue envers le fructose-6-phosphate. La réaction est irréversible et elle nécessite du magnésium qui forme un complexe

avec l'ATP et l'ADP. Cette enzyme clé de la glycolyse est régulée de façon allostérique. Elle est stimulée par une concentration élevée d'ADP, d'AMP et de fructose-2,6-bisphosphate, tandis qu'elle est inhibée par une concentration élevée d'ATP.

## **2-Phosphoglycérate**

Un intermédiaire de la glycolyse et de la gluconéogenèse.

## **3-Phosphoglycérate**

Un intermédiaire de la glycolyse et de la gluconéogenèse.

## **Phosphoglycérate kinase**

Enzyme, de la famille des transférase, catalysant le transfert d'un groupe phosphoryle du 1,3-bisphosphoglycérate à l'ADP pour former du 3-phosphoglycérate et de l'ATP. Elle catalyse donc une phosphorylation au niveau du substrat. La réaction est réversible. Attention : La réaction inverse est une phosphorylation, mais non une phosphorylation au niveau du substrat.

## **Phosphoglycérate mutase**

Enzyme, de la famille des isomérases, catalysant le transfert d'un groupe phosphoryle du troisième atome de carbone du 3-phosphoglycérate au deuxième atome de carbone, ce qui produit le 2-phosphoglycérate

## **Réaction irréversible**

Réaction qui ne se fait que dans un sens.

## **Réaction réversible**

Réaction pouvant se faire dans un sens ou dans le sens inverse.

## **Réactions couplées**

Deux réactions sont couplées lorsque le produit d'une réaction est le substrat d'une autre réaction. **Récepteur**

Protéine à laquelle peut se lier un ligand spécifique, tels un neurotransmetteur ou une hormone, ce qui entraîne un effet ou une réponse. Des récepteurs sont localisés dans la membrane plasmique, le cytosol et le noyau des cellules.

## **Récessif**

Gène récessif.

## **Réduction**

Gain d'un ou plusieurs électrons par une molécule, parfois accompagné d'un gain de protons ( $H^+$ ).

### **Régulation allostérique**

Modulation de l'activité d'une enzyme allostérique en fonction de la concentration d'effecteurs allostériques positifs ou négatifs.

### **Résidu d'un acide aminé**

Portion distinctive d'un acide aminé. Lorsqu'un acide aminé fait partie de la structure d'une protéine, c'est la portion de l'acide aminé qui ne participe pas à la liaison peptidique et qui demeure libre.

### **Respiration cellulaire**

Consommation d'oxygène par les cellules au cours du métabolisme. Elle est principalement attribuable au transfert d'électrons dans la chaîne respiratoire.

### **Réticulum endoplasmique**

Organite localisé dans le cytoplasme des cellules. Système de vésicules et de canalicules délimités par des membranes. Des ribosomes sont liés à la face externe d'une partie du réticulum endoplasmique. Cet organite joue un rôle important dans la synthèse, la transformation et la sécrétion des protéines, et dans la synthèse des acides gras, des triacylglycérols, des phospholipides et du cholestérol.

### **Réversible**

Réaction réversible.

### **Riboflavine**

Vitamine B2. Vitamine hydrosoluble faisant partie de la structure du FMN et du FAD, des coenzymes nécessaires à plusieurs réactions d'oxydoréduction catalysées par des flavoprotéines. Le lait et les céréales sont de bonnes sources de riboflavine. Une carence en riboflavine entraîne une fissuration des lèvres et une coloration pourpre de la langue.

### **Ribonucléoside**

Nucléoside formé par l'union d'une purine ou d'une pyrimidine et du ribose.

### **Ribonucléoside monophosphate**

Nucléoside monophosphate formé par l'union d'une purine ou d'une pyrimidine, du ribose et d'un groupe phosphate. Les principaux sont l'AMP et le GMP (nucléotides puriques), le CMP et l'UMP (nucléotides pyrimidiques). Ce sont les monomères constituant l'ARN.

### **Ribonucléotide**

Nucléotide formé par l'union d'une purine ou d'une pyrimidine et du ribose (ce qui constitue un ribonucléoside), auquel sont liés un, deux ou trois groupes phosphates.

**Ribose**

Monosaccharide (ose) de la famille des pentoses. `

**Ribosome**

Particule constituée d'ARN et de protéines, servant à la synthèse des protéines. Les ribosomes sont soit libres dans le cytoplasme, soit liés au réticulum endoplasmique.

**Saccharose**

Sucrose (anglicisme). Disaccharide constitué d'une molécule de glucose unie à une molécule de fructose par une liaison glycosidique. C'est le sucre de table extrait de la canne à sucre ou de la betterave à sucre.

**Sang**

Fluide circulant dans les vaisseaux sanguins, constitué d'un milieu liquide (plasma) dans lequel baignent les éléments figurés.

**Sérine**

Acide aminé glucoformateur. Il fait partie de la structure des phosphatidylsérines.

**Signe**

Trouble perceptible par une personne indisposée ou malade (signe subjectif ou symptôme), ou trouble observable par une autre personne (signe objectif).

**Site actif**

Centre actif, site catalytique. Site particulier dans une molécule d'une enzyme où se lient les substrats et où se produit la réaction enzymatique.

**Site allostérique**

Site particulier d'une enzyme où se lie un effecteur allostérique. Il peut y avoir plusieurs sites allostériques différents dans une molécule enzymatique.

**Site catalytique**

Site actif.

**Sodium (Na<sup>+</sup>)**

Ion métallique, principal cation dans le milieu extracellulaire, important pour le maintien de la pression osmotique et de l'équilibre hydrique. Il est transporté au travers de la membrane plasmique grâce à la pompe à sodium.

**Sous-unité**

Monomère. Protéine constituant une partie d'une protéine multimérique. Elle peut être isolée après dissociation de la protéine multimérique.

**Spécificité absolue**

Propriété de certaines enzymes de ne transformer qu'un seul substrat en un ou plusieurs produits.

**Spécificité d'isomère**

Stéréospécificité. Propriété de certaines enzymes de ne transformer qu'un seul isomère stérique d'une molécule. Par exemple, l'hexokinase ne peut phosphoryler que le D-glucose et non le L-glucose.

**Spécificité structurale**

Propriété de certaines enzymes de transformer plusieurs substrats ayant des structures moléculaires analogues. Par exemple, l'hexokinase peut phosphoryler plusieurs hexoses : le glucose, le fructose et le mannose.

**Stabilité thermique**

Propriété d'une molécule de conserver sa structure moléculaire tridimensionnelle intacte lorsque la température du milieu s'élève.

**Stéréoisomères**

Isomères optiques.

**Stéréospécificité**

Spécificité d'isomère.

**Stimulation**

Augmentation de l'activité d'une enzyme ou augmentation de la vitesse d'une voie métabolique.

**Substance oxydée**

Molécule ayant perdu un ou plusieurs électrons.

**Substance réduite**

Molécule ayant reçu un ou plusieurs électrons.

**Substrat**

Molécule qui, après s'être liée au site actif d'une enzyme, est transformée en un ou plusieurs produits.



**Sucre complexe**

Polysaccharide.

**Sucrose**

Saccharose.

**Symptôme**

Trouble perceptible par une personne indisposée ou malade, ou signe observable par une autre personne.

**Thrombocyte**

Plaquette.

**Thymidine**

Nucléoside, de la famille des pyrimidines, constitué de la thymine unie au 2-désoxyribose.

**Thymidine 5'-monophosphate**

dTMP .

**Thymidine 5'-triphosphate**

dTTP .

**Thymine**

Base azotée de la famille des pyrimidines, entrant, entre autres, dans la structure du dTTP, du dTMP et des acides nucléiques.

**Trait**

Caractère.

**Transférase**

Enzyme catalysant le transfert d'un groupe d'une molécule à une autre. Par exemple, les kinases catalysent le transfert d'un groupe phosphoryle et les aminotransférases (transaminases) catalysent le transfert d'un groupe aminé (-NH<sub>2</sub>).

**Transport actif**

Passage d'une molécule au travers d'une membrane, du côté où elle est moins concentrée vers le côté où elle est plus concentrée, grâce à un transporteur spécifique. Ce mécanisme de transport nécessite de l'énergie provenant de l'hydrolyse de l'ATP.

### **Transport par diffusion facilitée**

Transport passif d'une molécule grâce à un transporteur membranaire spécifique. Le transport du glucose dans les érythrocytes à l'aide du transporteur GLUT-1 est un exemple de transport par diffusion facilitée.

### **Transport par diffusion simple**

Transport passif d'une molécule sans l'aide d'un transporteur membranaire spécifique. Le transport de l'oxygène et du gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) au travers d'une membrane est un exemple de transport par diffusion simple.

### **Transport passif**

Passage d'une molécule au travers d'une membrane, du côté où elle est plus concentrée vers le côté où elle est moins concentrée. Le transport passif se fait soit par diffusion simple, soit par diffusion facilitée.

### **Transporteur membranaire**

Protéine membranaire liant spécifiquement un ligand et permettant à celui-ci de passer au travers de la membrane plasmique par un mécanisme de transport actif ou de transport passif.

### **Travail**

Force qui agit pour modifier un système.

### **Triacylglycérol**

Lipide constitué de trois acides gras unis aux trois groupes alcool (-OH) du glycérol par une liaison ester. Il existe de nombreux triacylglycérols différant par leurs acides gras.

### **Triose**

Monosaccharide (ose) à 3 atomes de carbone.

### **Triose phosphate isomérase**

Enzyme, de la famille des isomérases, catalysant la transformation du dihydroxyacétone phosphate, un cétose, en glycéraldéhyde-3-phosphate, un aldose. La réaction est réversible.

### **Tryptophane**

Acide aminé essentiel et glucoformateur servant, entre autres, à la synthèse de la niacine.

### **UDP**

Deux groupes phosphates unis par une liaison pyrophosphate à haut potentiel énergétique.

## **UMP**

Uridine 5'-monophosphate. Nucléotide, de la famille des pyrimidines, constitué de l'uracile, du ribose et d'un groupe phosphate.

## **Uracile**

Base azotée de la famille des pyrimidines, entrant, entre autres, dans la structure du de l'UTP, de l'UDP, de l'UMP et des acides nucléiques.

## **Urate**

Forme ionisée de l'acide urique. Une concentration trop élevée d'acide urique dans le sang entraîne la goutte, une maladie caractérisée par la cristallisation et la formation de concrétions d'urate de sodium dans certaines articulations, sous la peau ou dans les reins.

## **Uridine**

Nucléoside, de la famille des pyrimidines, constitué de l'uracile unie au ribose.

## **Uridine 5'-diphosphate**

UDP .

## **Uridine 5'-monophosphate**

UMP .

## **Uridine 5'-triphosphate**

UTP.

## **UTP**

Uridine 5'-triphosphate. Nucléotide, de la famille des pyrimidines, servant à emmagasiner et à transporter de l'énergie. Il est constitué de l'uracile, du ribose et de trois groupes phosphates unis les uns aux autres par deux liaisons pyrophosphates à haut potentiel énergétique. Uridine-5'-diphosphate. Nucléotide, de la famille des pyrimidines, constitué de l'uracile, du ribose et de

## **Vésicule**

Petit sac.

## **Vitamine**

Molécule essentielle au métabolisme et, ainsi, à la croissance et au bon fonctionnement de l'organisme. La plupart des vitamines ne sont pas synthétisées dans l'organisme humain, mais quelques-unes le sont, quoiqu'en quantité insuffisante, de sorte que toutes les vitamines doivent être obtenues de l'alimentation.

**Vitamine antipellagreuse**

Niacine.

**Vitamine B2**

Riboflavine.

**Vitamine B3**

Niacine.

**Vitamine PP**

Niacine.

**Vitesse d'une réaction**

Quantité de substrat transformé en produit par unité de temps.

**Voie anabolique**

Voie métabolique faisant partie de l'anabolisme.

**Voie catabolique**

Voie métabolique faisant partie du catabolisme.

**Voie d'Embden-Meyerhof**

Glycolyse anaérobie.

**Voie métabolique**

Séquence de réactions couplées.

**Xanthine**

Base azotée de la famille des purines.